

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
АКАДЕМИЯ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ КОСМОНАВТИКИ имени К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ» РАН  
(ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР РАН имени А. А. ДОРОДНИЦЫНА)  
АО «УПКБ "ДЕТАЛЬ"», АО «РАДИОЗАВОД»  
АО «ФНПЦ «ПО "СТАРТ" имени М. В. ПРОЦЕНКО», АО «НИИЭМП»  
АО «ПНИЭИ», АО «НИИФИ», АО «НПП "РУБИН"»  
ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Л. Н. ГУМИЛЕВА  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



**ТРУДЫ**  
**МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА**  
**НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО**

**Том 2**

*Посвящается году единства народов России и 65-летию  
со дня первого полета Юрия Гагарина в космос*

**ПЕНЗА 2026**

**Труды Международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО. – 2026. – Т. 2. – 462 с.**

Представлены доклады XXXI Международного симпозиума «Надежность и качество», посвященного году единства народов России и 65-летию со дня первого полета Юрия Гагарина в космос, проходившего с 25 по 31 мая 2026 г. в г. Пензе. Рассмотрены актуальные проблемы теории и практики повышения надежности и качества; эффективности внедрения инновационных и информационных технологий в фундаментальные научные и прикладные исследования, образовательные и коммуникативные системы и среды, экономику и юриспруденцию; методов и средств анализа и прогнозирования показателей надежности и качества приборов, устройств и систем, а также анализа непараметрических моделей и оценки остаточного ресурса изделий двойного назначения; ресурсосбережения; проектирования интеллектуальных экспертных и диагностических систем, систем управления и связи, интерактивных, телекоммуникационных сетей и сервисных систем; экологического мониторинга и контроля состояния окружающей среды и биологических объектов; исследования физико-технологических процессов в науке, технике и технологиях для повышения качества выпускаемых изделий радиопромышленности, приборостроения, аэрокосмического и топливно-энергетического комплексов, электроники и вычислительной техники и др.

Издание предназначено для студентов, аспирантов, ученых и научных сотрудников, заинтересованных в исследовании надежности и качества эффективных комплексных систем.

УДК 621.396.6:621.315.616.97:658:562

Оргкомитет благодарит за поддержку в организации и проведении Международного симпозиума и издания настоящих трудов Министерство науки и высшего образования РФ, Правительство Пензенской области, Академию проблем качества РФ, Российскую академию космонавтики имени К. Э. Циолковского, Российскую инженерную академию, ФИЦ ИУ РАН (Вычислительный центр РАН имени А. А. Дородницына), АО «УПКБ “ДЕТАЛЬ”», АО «НИИФИ», АО «ПНИЭИ», АО «НПП “РУБИН”», АО «РАДИОЗАВОД», АО «ППО “ЭЛЕКТРОПРИБОР”», АО «НИИЭМП», АО «ФНПЦ «ПО “СТАРТ” имени М. В. Проценко», АО «НИКИРЭТ», ООО «Экспериментальная мастерская “Наука-Софт”», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Пензенский государственный университет.

*Издание зарегистрировано в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) с 2005 г.*

**Редакционная коллегия:**

**Юрков Н. К.** – главный редактор;  
**Трусов В. А.** – ответственный секретарь;  
**Гуляков А. Д., Васин С. М., Сыдыков Е. Б., Абрамов О. В.,**  
**Артамонов Д. В., Безродный Б. Ф., Бецков А. В., Дивеев А. И., Иофин А. А.,**  
**Каштанов В. А., Кемалов Б. К., Острейковский В. А., Пиганов М. Н.,**  
**Роберт И. В., Романенко Ю. А., Савченко В. П., Садыхов Г. С.,**  
**Халютин С. П., Шахнов В. А., Якимов А. Н.**

## ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.316.54

**Китаев<sup>1</sup> В.Н., Кирюнин<sup>2</sup> А.Е., Сафонов<sup>3</sup> Д.И., Сергин<sup>4</sup> С.Ф.**

<sup>1,2,3,4</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> kb2@vniitf.ru

### КЛАПАН - ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ КАНАЛОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

**Аннотация.** В технологическом оборудовании химической промышленности и машиностроения применяются клапаны – переключатели каналов высокого давления для предохранения газовых систем высокого давления.

**Ключевые слова:** переключатели, высокое давление, газовые системы

**Kitaev<sup>1</sup> V.N., Kiryunin<sup>2</sup> A.E., Safonov<sup>3</sup> D.I., Sergin<sup>4</sup> S.F.**

<sup>1,2,3,4</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> kb2@vniitf.ru

### VALVE - HIGH-PRESSURE CHANNEL SWITCH

**Abstract.** Valves – switches of high-pressure channels are used in technological equipment of the chemical industry and mechanical engineering for protection of high-pressure gas systems.

**Keywords:** switches, high pressure, gas systems

В технологическом оборудовании химической промышленности и машиностроения применяются клапаны – переключатели каналов высокого давления для предохранения газовых систем высокого давления.

Подобные клапаны должны обеспечивать при больших давлениях в газовых системах:

- переключение состояния за малое время;
- сохранение переключенного состояния;
- обеспечение высокой герметичности переключаемых каналов;
- повышенную надежность работы (переключения и сохранения переключенного состояния).

С использованием ранее накопленного научно-технического задела [1, 2] по конструированию подобных устройств разработано техническое решение клапана-переключателя, обеспечивающего выполнение предъявленных к нему требований.

Конструкция клапана иллюстрируется рисунками.

На рисунке 1 приведен общий вид клапана – переключателя каналов высокого давления в исходном состоянии (в разрезе). Входной канал  $P_{вх}$  соединен с первым выходным каналом  $P_{вых1}$ . Второй выходной канал  $P_{вых2}$  отделен от входного  $P_{вх}$  и первого выходного  $P_{вых1}$  каналов герметичной перемычкой.

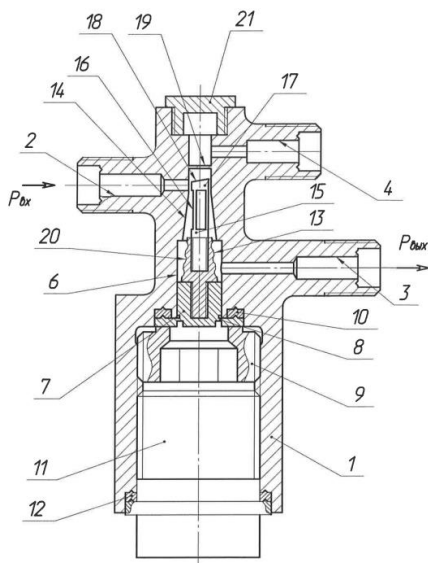


Рисунок 1 – Исходное состояние клапана-переключателя

На рисунке 2 – общий вид клапана – переключателя каналов высокого давления в сработанном состоянии. Входной канал  $P_{вх}$  соединен со вторым выходным каналом  $P_{вых2}$ . Первый выходной канал  $P_{вых1}$  герметизирован конической пробкой, перемещенной в седло.

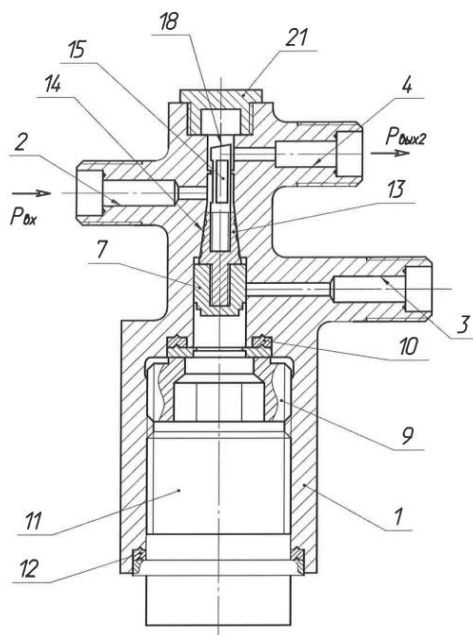


Рисунок 2 – Переключенное состояние клапана-переключателя

**Клапан – переключатель выполнен следующим образом**

Клапан – переключатель каналов высокого давления (рисунки 1-2) состоит из корпуса 1, имеющего один впускной 2 и два выпускных канала 3, 4. Корпус 1 выполнен с полостью 5, в цилиндрической расточке 6 которой закреплен поршень 7 с ослабленным сечением 8, поджатый гайкой 9. Герметичность закрепленного поршня 7 обеспечивается уплотняющей шайбой 10, выполненной из пластичного металла, например меди. В полость 5 корпуса 1 ввинчен пиропривод 11, герметизированный уплотняющей шайбой 12, также из пластичного металла. Пиропривод 11 выполнен с лазерным задействованием без использования электрических цепей, то есть содержит лазерный детонатор (на рисунках не показан), который выполнен, например, по патенту РФ № 2750750 или № 2781230.

На поршне 7 закреплена коническая пробка 13, установленная с возможностью заклинивания в седле 14, выполненном в полости 5 корпуса и разобщения впускного 2 и первого выпускного канала 3. В исходном состоянии второй выпускной канал 4 загерметизирован разрушаемой перемычкой 19, выполненной за одно целое с корпусом 1.

Поршень 7 снабжен штоком 15 с пробойником 17, переключающим выпускные каналы 3, 4. Шток 15, коническая пробка 13 и поршень 7 выполнены отдельными деталями. Коническая пробка 13 размещена между штоком 15 и поршнем 17. В коническую пробку 13 ввинчен шток 15 с лысками 16 на боковой цилиндрической поверхности. Выступающая часть штока 15 – пробойник 17 имеет наклонный к продольной оси передний торец 18. Величина хода штока 15 многократно превышает величину наклона переднего торца 18.

На конической поверхности конической пробки 13 выполнены кольцевые канавки 20, обеспечивающие большие удельные давления за счет уменьшения площади зон взаимодействия конических поверхностей пробки 13 и седла 14, повышающие надежность срабатывания и конструктивные запасы клапана по герметичности переключенных выпускных каналов 3, 4 при значительном давлении без значительного увеличения мощности пиротехнического привода 11.

Продольные оси полости 5 корпуса 1 и второго выпускного канала 4 взаимно перпендикулярны и пересекаются. На корпус 1 навинчена заглушка 21, дополнительно герметизированная пайкой или сваркой.

**Клапан – переключатель каналов высокого давления работает следующим образом**

В исходном состоянии заявляемого клапана – переключателя (рисунок 1) впускной канал 2 соединен с первым выпускным каналом 3.

При задействовании пиропривода 11, создаваемым им давлением разрушается ослабленное сечение 8 поршня 7, который после этого перемещается, разрушая пробойником 17 штока 15 герметизирующую перемычку 19 до заклинивания конической пробки 13 в коническом седле 14. В результате чего впускной канал 2



отсоединяется от выпускного канала 3 и подсоединяется ко второму выпускному каналу 4 (рисунок 2). Конструкция и расположение ослабленного сечения 8 поршня 7 не препятствует его перемещению с закрепленной конической пробкой 13 после разрушения.

Заглушка 21, ввинченная в корпус 1 и дополнительно герметизированная пайкой или сваркой, обеспечивает возможность выполнения второго выпускного канала 4 перпендикулярным к перемещению штока 15. Продольная ось второго выпускного канала 4 и продольная ось полости 5 в корпусе 1 пересекаются (расположены в одной плоскости).

Отверстие под заглушкой 21 выполняет функцию ловителя разрушаемых конструктивных элементов – перемычки 19 при срабатывании клапана, предотвращает ее попадание во второй выпускной канал 4.

Надежная работа клапана – переключателя каналов высокого давления заключается в выполнении следующих условий:

- разрушение ослабленного сечения 8 поршня 7 создаваемым давлением пиропривода 11;

- разрушение перемычки 19 торцевой поверхностью 18 штока 15 на начальном участке его перемещения;

- совместное перемещение штока 15, конической пробки 13 и поршня 7 с разобщением конической пробкой 13 первого выпускного канала 3 и гарантированным заклиниванием конической пробки 13 в коническом седле 14 с обеспечением необходимого проходного сечения из выпускного 2 во второй выпускной канал 4 и исключения попадания разрушаемых конструктивных элементов клапана во второй выпускной канал 4.

При этом переключение каналов высокого давления при срабатывании клапана не сопровождается критичными для элементов конструкции клапана и объекта применения виброударными воздействиями.

#### **Новые технические решения и их положительный эффект в конструкции клапана – переключателя**

Выполнение штока 15, конической пробки 13 и поршня 14 отдельными деталями позволяет обрабатывать конические поверхности седла 14 и пробки 13 одну по другой с обеспечением практически одинаковых углов конусов и последующего совместного использования деталей реализует идентичность условий заклинивания с обеспечением высокой герметичности после срабатывания – переключения каналов. Данное техническое решение также позволяет выполнять указанные детали из разных металлов и сплавов с требуемой термообработкой.

Выполнение штока 15 с лысками 16 на боковой цилиндрической поверхности увеличивает как его механическую прочность на изгиб, так и обеспечивает необходимую проходимость организованного после срабатывания канала.

Выполнение торцевой поверхности 18 штока 15 наклонной к продольной оси с наклоном многократно меньшим хода штока 15 при срабатывании обеспечивает большее удельное давление при начале внедрения торца 18 штока 15 в разрушаемую перегородку 19 между каналами и гарантированное разрушение перегородки 19 на площади не меньшей площади поперечного сечения пробойника 17 штока 15, следовательно, повышает надежность срабатывания клапана.

Выполнение второго выпускного канала 4 в корпусе 1 перпендикулярным к перемещению штока 15 исключает попадание разрушаемых конструктивных элементов клапана во второй выпускной канал 4 при его срабатывании.

Выполнение на конической пробке 13 кольцевых канавок 20, обеспечивает при срабатывании клапана большие удельные давления за счет уменьшения площади зон взаимодействия конических поверхностей пробки 13 и седла 14. Данное техническое решение повышает надежность срабатывания, сохранения сработавшего состояния и конструктивные запасы клапана при имеющемся пиропроводе 11.

Таким образом разработанный клапан – переключатель каналов высокого давления обеспечивает герметичность и надежность срабатывания с исключением создания при срабатывании критичных для объекта использования виброударных воздействий.

На техническое решение клапана – переключателя получен патент РФ [3].

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Клапаны пиротехнические (варианты), патент РФ №2641789, заявка №2017112250 от 10.04.2017, МПК F 16K 17/14, зарегистрировано 22.01.2018.
2. Клапан-переключатель каналов высокого давления, патент РФ №2791170, заявка №20221150081 от 02.06.2022, МПК F 16K 17/14, зарегистрировано 03.03.2023.
3. Клапан-переключатель каналов высокого давления, патент РФ №2848582, заявка №2025105714 от 12.03.2025, МПК F 16K 17/14, опубликовано 21.10.2025.

УДК 53.082.36

**Китаев<sup>1</sup> В.Н., Титов<sup>2</sup> Е.В., Бабушкина<sup>3</sup> Е.В.**

<sup>1,2,3</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

## **МЕМБРАННЫЙ ДАТЧИК ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ**

**Аннотация.** Для управления пневматическими и гидравлическими системами летательных аппаратов необходимы датчики избыточного давления с нормируемыми пороговыми давлениями срабатывания/взведения при повышении/понижении соответственно давления в системе.

**Ключевые слова:** датчик давления, мембрана

**Kitaev<sup>1</sup> V.N., Titov<sup>2</sup> E.V., Babushkina<sup>3</sup> E.V.**

<sup>1,2,3</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia

<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

## **MEMBRANE OVERPRESSURE SENSOR**

**Abstract.** To control the pneumatic and hydraulic systems of aircraft, it is necessary to use overpressure sensors with regulated threshold pressures for activation/arming when the pressure in the system increases/decreases, respectively.

**Keywords:** pressure sensor, membrane

Известные в настоящее время пороговые датчики избыточного давления [1, 2, 3], применяемые для указанных целей, реализованы с использованием прощелкивающих (хлопающих) мембран и, в основном обеспечивают нормируемое значение давления срабатывания, не позволяя обеспечивать нормируемое значение давления взведения. Кроме того давление взведения известных датчиков значительно – в три и более раза меньше давления срабатывания. Увеличение давления взведения в датчиках с подобными мембранами при требуемом давлении срабатывания, точнее соотношения давления взведения к давлению срабатывания, технологически сложная задача.

Создано техническое решение мембранного чувствительного элемента избыточного давления, обеспечивающего возможность настройки датчика, как на пороговое давление срабатывания, так и на пороговое давление взведения.

Указанный технический результат достигается тем, что пороговый датчик избыточного давления оснащается двумя мембранами, установленными встречно: прощелкивающейся мембраной и мембраной без гистерезиса срабатывания и взведения.

### **Состав датчика**

Конструкция датчика иллюстрируется чертежами:

на рисунке 1 – представлен осевой разрез порогового датчика избыточного давления в исходном состоянии;

на рисунке 2 – контакт в исходном состоянии;

на рисунке 3 – замкнутое состояние контакта при давлении срабатывания;

на рисунке 4 – состояние контакта при давлении взведения.

На рисунках 1 – 4 приняты следующие обозначения:

1 – корпус;

2 – основной мембранный чувствительный элемент давления;

3 – дополнительный мембранный чувствительный элемент давления;

4 – контакт;

5 – прощелкивающаяся мембрана основного чувствительного элемента давления;

6 – мембрана без гистерезиса дополнительного чувствительного элемента давления;

7 – центральное отверстие корпуса;

8 – первая часть контакта;

9 – вторая часть контакта;

10 – седло в корпусе под мембраной основного чувствительного элемента давления;

11 – седло в корпусе под мембраной дополнительного чувствительного элемента давления;

12 – накладка мембраны основного чувствительного элемента давления;

13 – накладка мембраны дополнительного чувствительного элемента давления;

14 – отверстия (каналы) накладки прощелкивающейся мембраны;

15 – отверстия (каналы) накладки мембраны без гистерезиса.

### **Конструкция датчика**

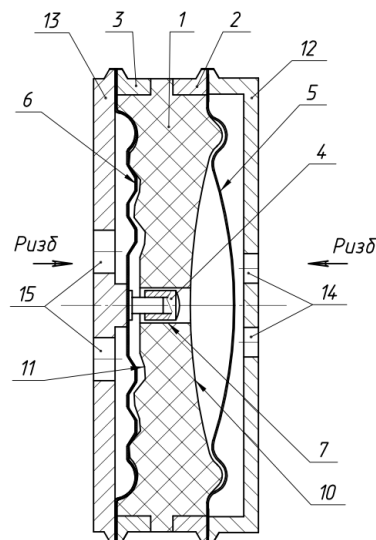


Рисунок 1

Пороговый датчик избыточного давления (рисунок 1) содержит корпус 1 из изоляционного материала, в углубления корпуса 1 с обоих торцов установлены мембранные чувствительные элементы давления 2, 3 с прошелкивающейся мембраной 5 и с мембраной без гистерезиса 6 (например, мембраной с гофрами с линейной характеристикой) соответственно. При этом высота контакта 4 меньше расстояния между центрами мембран 5, 6 при прошелкнутой мембране 5 при действии на наружную поверхность мембран 5, 6 давления меньшего давления взведения и равна этому расстоянию при прошелкнутой мембране 5 при действии на наружную поверхность мембран 5, 6 давления взведения. Взаимно контактирующие поверхности мембраны 5 и контакта 4 имеют покрытие, например НЗЗлЗтв., обеспечивающее малое переходное электрическое сопротивление.

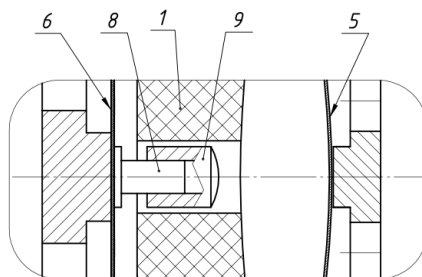


Рисунок 2

Выполнение корпуса 1 из изоляционного материала, например вакуум-плотной корундовой керамики ВК94-1, обеспечивает надежное закрепление чувствительных элементов давления 2, 3 пайкой и требуемое сопротивление изоляции между ними.

Мембраны 5, 6 закрыты соответствующими накладками 12, 13, в которых выполнены отверстия 14, 15 соответственно для подачи давления на внешние поверхности мембран 5, 6. Мембраны 5, 6 и накладки 12, 13 в составе соответствующих чувствительных элементов давления 2, 3 герметично сварены по внешнему диаметру.

Контакт 4 закреплен к центру мембраны 6 дополнительного чувствительного элемента давления 3 и выполнен из двух взаимно запрессованных друг в друга, например по легкомпрессовой посадке, составных частей 8, 9. Данное техническое решение обеспечивает требуемую высоту контакта 4 в процессе настройки датчика путем взаимной запрессовки составных частей 8, 9 контакта 4 от усилия через мембраны 5, 6. После указанной «регулировки» высоты контакта 4 возможна дополнительная взаимная контровка составных частей 8, 9 контакта 4, например лазерной сваркой.

Диаметр отверстия 7 в корпусе 1 превышает диаметр контакта 4. Закрепление контакта 4 на мембране 6 предпочтительнее его закрепления на мембране 5, так как центр мембраны 6, по сравнению с центром мембраны 5, при прогибе не подвержен значительным изгибным колебаниям. Под мембранами 5, 6 на корпусе 1 выполнены седла 10, 11, повторяющее профиль упруго деформированных соответствующих мембран 5, 6 при давлении срабатывания и этим исключающие разрушение мембраны и изменение устойчивого давления срабатывания и взведения при возможных значительных перегрузочных давлениях в системе.

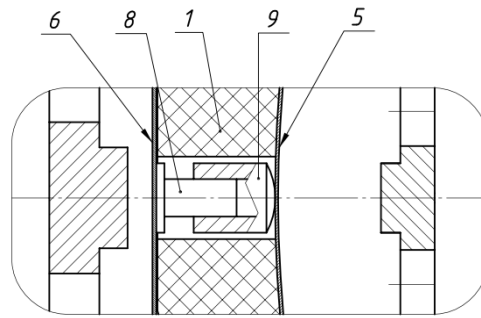


Рисунок 3

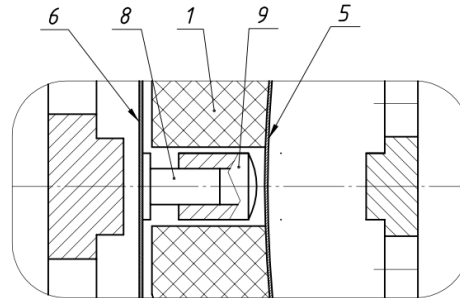


Рисунок 4

Внутренний объем датчика под мембранами 5, 6 сообщается с внешней средой через организованные в корпусе 1 каналы (на чертежах не показаны), обеспечивая работоспособность датчика в широком диапазоне температур внешней среды и при повышенной температуре рабочей среды, исключая изменение давления под мембраной по отношению к давлению внешней, а также рабочей среды при изменении их температур, которое могло бы вносить значительную температурную погрешность.

#### Работа датчика

Давление на мембраны 5, 6 подается через отверстия 14, 15 накладок 12, 13. При увеличении давления в системе до величины срабатывания мембрана 6 упруго деформируется, а мембрана 5 прощелкивается, замыкая электрическую цепь между мембранами 5, 6 через контакт 4 (рисунок 3).

При снижении давления рабочей среды в системе электрическая цепь между мембранами 5, 6 сохраняется, так как мембрана 5 остается в прощелкнутом состоянии, а мембрана 6 – в поджатом к торцу контакта 4 состоянии (рисунок 4). При достижении давлением в системе величины взведения центр мембраны 6 начинает перемещаться, мембрана 5 остается в прощелкнутом состоянии, так как прощелкивающиеся мембраны принимают первоначальную форму при давлениях взведения в разы меньших давления срабатывания (прощелкивания). При этом, при достижении давления в системе величины взведения, электрическая цепь между мембранами 5, 6 размыкается, так как высота контакта 4 при этом состоянии датчика меньше расстояния между центрами мембран 5, 6 (рисунок 2).

При дальнейшем спаде давления в системе мембрана 5 принимает первоначальную форму. При этом состояние электрической цепи между мембранами остается разомкнутым.

Пороговые значения избыточного давления **срабатывания** датчика обеспечивается подбором или электрополированием наружной поверхности мембраны 5 в составе чувствительного элемента давления 2. Пороговые значения избыточного давления **взведения** датчика обеспечивается подбором или электрополированием внешней поверхности мембраны 6 в составе чувствительного элемента давления 3. При этом обеспечивается соотношение давлений срабатывания и взведения в широких пределах, что позволяет решать поставленную изобретением задачу и расширять область применения заявляемого датчика.

#### Достигнутый результат

Таким образом, датчик способен осуществить возможность обеспечения настройки датчика, как на пороговое давление срабатывания, так и на пороговое давление взведения для расширения областей его применения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пороговый датчик избыточного давления. Патент РФ №2771887, МПК H01N 35/14, опубл. 13.05.2022.
2. Гидростатический включатель. Патент РФ №2677838, МПК H01N 35/14, опубл. 21.01.2019.
3. Гидростатический включатель. Патент РФ №2691158, МПК H01N 35/14, опубл. 11.06.2019.

УДК 618.1

**Гордейчук<sup>1</sup> К.А., Перебатов<sup>2</sup> В.Н.**

<sup>1,2</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

<sup>1,2</sup> kb2@vniitf.ru

### **СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКСЕЛЕРОМЕТРА НА УСТАНОВКЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ**

**Аннотация.** Для управления подвижным объектом необходимо в режиме реального времени знать параметры его движения. Одним из способов получения данной информации является расчёт бесплатформенной инерциальной навигационной системой на основании показаний инерциальных датчиков блока чувствительных элементов.

**Ключевые слова:** блок чувствительных элементов, инерциальные системы, калибровка, акселерометры, гироскопы, компенсация погрешностей

**Gordeychuk<sup>1</sup> K.A., Perebatov<sup>2</sup> V.N.**

<sup>1,2</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia

<sup>1,2</sup> kb2@vniitf.ru

### **METHOD FOR IMPROVING THE ACCURACY OF DETERMINING ACCELEROMETER PARAMETERS AT A CENTRIFUGAL INSTALLATION**

**Abstract.** To control a moving object, it is necessary to know its motion parameters in real time. One way to obtain this information is by using a free-platform inertial navigation system (FINS) based on the readings of inertial sensors in a sensor unit (SU). This paper presents the results of the development of a sensor unit, including its characteristics and a mathematical model of its operation.

**Keywords:** sensor unit, inertial systems, calibration, accelerometers, gyroscopes, error compensation

В настоящее время существует необходимость повышения точности измерения линейного ускорения, которое может достигаться путём увеличения точности при градуировке и калибровке характеристики акселерометра.

При испытаниях на центробежной установке задаваемое ускорение прямопропорционально радиусу вращения, т.е. расстоянию от оси вращения до центра инерции акселерометра, или, другими словами, до центра масс чувствительного элемента акселерометра (далее по тексту – ЦМ). Поэтому для повышения точности градуировки, калибровки или испытаний акселерометра необходимо знать точный радиус вращения.

Положение ЦМ зависит от множества факторов, таких как допуски при изготовлении, свойства материала чувствительного элемента, точность изготовления и установки оснастки. Определить точные координаты ЦМ акселерометра путём прямого измерения затруднительно и в отдельных случаях принципиально невозможно. Прямое определение координат оси вращения центробежной установки также невозможно.

Дополнительно на результат определения радиуса вращения центробежной установки влияют:

- погрешности измерительного оборудования;
- угловое отклонение оси чувствительности акселерометра от радиуса вращения;
- температура внешней среды.

Разработан способ [1], позволяющий определять радиус вращения центробежной установки с заданной точностью ( $\varepsilon$ ), которая зависит только от дрейфа нулевого сигнала испытываемого акселерометра при нормальных условиях:

1) акселерометр устанавливают на неподвижном основании так, чтобы его ось чувствительности была горизонтальна, и выполняют измерение его выходного сигнала ( $a_0$ );

2) акселерометр устанавливают на неподвижном основании так, чтобы его ось чувствительности была направлена вертикально вверх, и выполняют измерение его выходного сигнала ( $a+g$ );

3) акселерометр устанавливают на центробежной установке так, чтобы измерительная ось была горизонтальна и направлена по радиусу к оси вращения центробежной установки, выполняют измерение его выходного сигнала ( $a_0'$ ), не задавая вращение центробежной установки;

4) выбирают произвольный радиус ( $R$ ) (например, до геометрического центра корпуса датчика), задают вращение на центробежной установке с постоянной угловой скоростью такое, чтобы на радиусе ( $R$ ) создавалось ускорение равное ускорению свободного падения ( $1g$ ), и выполняют измерение выходного сигнала акселерометра ( $a+g'$ );

5) вычисляют значение действительного радиуса ( $R'$ ):

$$R' = R \cdot \frac{a_{+g}' - a_0'}{a_{+g} - a_0}. \quad (1)$$

6) останавливают вращение центробежной установки и выполняют измерение выходного сигнала акселерометра ( $a_0''$ ), что позволяет свести к минимуму погрешность смещения нуля акселерометра;

7) задают вращение на центробежной установке с постоянной угловой скоростью такое, чтобы на действительном радиусе ( $R'$ ) создавалось ускорение равное ускорению свободного падения ( $1g$ ), и выполняют измерение выходного сигнала акселерометра ( $a+g''$ );

8) вычисляют погрешность заданного ускорения ( $\delta$ ):

$$\delta = \left| 1 - \frac{a_{+g}'' - a_0''}{a_{+g} - a_0} \right|; \quad (2)$$

9) сравнивают погрешность ( $\delta$ ) с пределом ( $\varepsilon$ ), и если погрешность ( $\delta$ ) меньше значения предела ( $\varepsilon$ ), которое выбирают от 5 до 10 раз меньше допустимой погрешности преобразования акселерометра, то для испытаний используют действительный радиус ( $R'$ ). Если  $\delta > \varepsilon$ , то вычисляют новый действительный радиус:

$$R'' = R \cdot \frac{a_{+g}'' + a_0''}{a_{+g} - a_0}; \quad (3)$$

10) операции по п. 6 - 9 повторяют до тех пор, пока погрешность ( $\delta$ ) превышает предел ( $\varepsilon$ ), при этом каждый раз уточняют действительный радиус. В результате данной операции будет определен действительный радиус вращения на центробежной установке с требуемой точностью.

Для испытаний акселерометра при ускорении в противоположном направлении операции по п. 2-10 повторяют, при этом при выполнении операции по п. 2 ось чувствительности акселерометра направляют вертикально вниз, а при выполнении операции по п. 3 акселерометр устанавливают на центробежной установке так, чтобы измерительная ось была горизонтальна и направлена по радиусу от оси вращения центробежной установки.

Пример применения способа в контрольной программе [2], приведён на рис. 1. Программа предназначена для проведения проверок блока инерциальных преобразователей.

Калибровка УЦ

Радиус R:  мм

При 0 г:  м/(с<sup>2</sup>)

При 1 г:  м/(с<sup>2</sup>)

Погрешность:  %

Новый радиус:  мм

Калибровка УЦ

Радиус R:  мм

При 0 г:  м/(с<sup>2</sup>)

При 1 г:  м/(с<sup>2</sup>)

Погрешность:  %

Новый радиус:  мм

Рисунок 2 – Внешний вид программы

На основании произвольно заданного радиуса  $R$  в поле "Радиус  $R$ :" (рис. 1а) и показаний акселерометра, определённых в положениях  $0g$ ,  $1g$  на неподвижном основании, рассчитан действительный радиус  $R'$  из поля "Новый радиус" (рис. 1а) с погрешностью ( $\delta$ ) (рис. 1б). Требуемый предел погрешности ( $\varepsilon$ ) задан значением  $0,01\%$ . Радиус вращения ЦМ определяется фактический при каждой переустановке акселерометра на центробежной установке.

Разработанный способ позволяет значительно повысить точность определения параметров акселерометра при градуировке, калибровке и испытаниях при воспроизведении ускорения на центробежной установке за счёт определения радиуса вращения ЦМ по показаниям акселерометра, при этом не требуется прямого измерения радиуса вращения центробежной установки для задания ускорения и изготовления точной оснастки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордейчук К.А., Перебатов В.Н. "Способ градуировки акселерометра", заявка на изобретение №2025121718 от 06.08.2025, г. Снежинск, ФГУП "РЯЦ-ВНИИТФ"
2. Перебатов В.Н., Обрезков А.Ю., Гордейчук К.А. Программа для ЭВМ "rbr110tu.exe", свидетельство о регистрации №2025661002 от 29.04.2025, г. Снежинск, ФГУП "РЯЦ-ВНИИТФ"

УДК 621.396.2:621.88

**Желнаков<sup>1</sup> К.А., Трусов<sup>2</sup> В.А.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## **СОЕДИНЕНИЯ И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ В КОРПУСАХ СМАРТФОНОВ: КЛЕЕВЫЕ УЗЛЫ, УПЛОТНЕНИЯ И ТЕРМОМЕХАНИКА (ОБЗОР)**

**Аннотация.** Рассмотрены типовые узлы соединений в корпусах современных смартфонов: клеевые швы, защелки, винтовые соединения и элементы герметизации (прокладки, герметики). Показано, что надежность корпуса определяется не только свойствами материала деталей, но и характеристиками соединений: адгезией, толщиной и геометрией клеевого слоя, контактными давлениями в уплотнениях, а также термомеханическим несоответствием разнородных материалов. Систематизированы классификации клеящих материалов и технологические тенденции проектирования клеевых соединений. На основе работ по анализу НДС элементов герметизирующих устройств и термомеханической прочности соединений микросистемных модулей сформулированы практические критерии оценки риска отказов (отслоение, течи, трещинообразование).

**Ключевые слова:** клеевые соединения, адгезия, герметизация, прокладки, контактное давление, разнородные материалы, ТКЛР, надежность, корпус смартфона

**Zheltnakov<sup>1</sup> K.A., Trusov<sup>2</sup> V.A.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## **JOINTS AND SEALING IN SMARTPHONE CASES: GLUE JOINTS, SEALINGS AND THERMOMECHANICS (OVERVIEW)**

**Abstract.** The review article discusses typical joints in the cases of modern smartphones: adhesive seams, latches, screw connections, and sealing elements (gaskets, sealants). It is shown that the reliability of the case is determined not only by the properties of the material of the parts, but also by the characteristics of the joints: adhesion, thickness and geometry of the adhesive layer, contact pressures in the seals, and thermomechanical mismatch of heterogeneous materials. The article systematizes the classifications of adhesive materials and technological trends in the design of adhesive joints. Based on the analysis of the stress-strain state of the sealing devices and the thermomechanical strength of the microelectronic modules, practical criteria for assessing the risk of failures (delamination, leakage, and cracking) have been formulated.

**Keywords:** adhesive joints, adhesion, sealing, gaskets, contact pressure, heterogeneous materials, thermal expansion coefficient, reliability, smartphone case

### **1 Введение**

Конструкция корпуса смартфона представляет собой многокомпонентную систему, в которой жесткость и долговечность задаются не только «материалом корпуса», но и набором соединительных узлов. Для тонкостенных деталей, стеклянных панелей и композитных рам характерны локальные концентрации напряжений в стыках, а при ударных и температурных воздействиях именно соединение разнородных материалов часто оказывается ограничивающим фактором [1]. С точки зрения водозащиты важнейшим параметром является не абстрактная «резинка», а контактное давление и деформация уплотняющего элемента по контуру [2].

Цель обзора – систематизировать типы соединений и герметизации в корпусах смартфонов и сформировать набор инженерных критериев выбора клеев, герметиков и конструкций стыков с учетом прочности, герметичности и термомеханической совместимости.

### **2 Типы соединений в корпусе смартфона и критерии выбора**

В современных изделиях можно выделить четыре базовые группы соединений:

- 1) клеевые соединения (стекло-рама, крышка-рама, элементы дисплея);
- 2) механические фиксаторы (защелки, направляющие, посадки с натягом);
- 3) резьбовые соединения (винты, стойки);
- 4) элементы герметизации (прокладки, герметики, клеи-герметики).

Выбор конкретного решения определяется многокритериально: прочность и усталостная стойкость, герметичность, ремонтпригодность, технологичность (подготовка поверхности, контроль толщины шва), требования к теплоотводу и массогабаритным характеристикам. Тенденции развития клеевой сборки подчеркивают рост роли технологического обеспечения качества: контроль подготовки поверхности, дозирование клея, автоматизация процессов и снижение вариативности толщины шва [3].

### **3 Клеящие материалы: классификация и критерии выбора**

Корректный выбор клея начинается с понимания его класса и механизма отверждения. В работе М.Л. Калининско и В.М. Александрова проведен анализ мировых классификаций клеящих материалов и показано, что для промышленного выбора важны не только химическая природа (эпоксидные, акрилатные, полиуретановые и др.), но и эксплуатационные свойства: прочность при сдвиге/отрыве, стойкость к влаге, температурный диапазон, ползучесть, совместимость с материалами подложек [4].

Для корпусов смартфонов типовой состав включает:

- 1) высокопрочные конструкционные клеи для металлических/композитных деталей;
- 2) клеи и ленты для крепления дисплея и задней крышки, где важны упругость и демпфирование;
- 3) клеи-герметики для контуров влагозащиты.

В обзорных материалах по клеям и герметикам (WAC-2012) подчеркивается расширение номенклатуры адгезивных материалов и рост требований к эксплуатационной стабильности и технологичности соединений [5].

#### 4 Проектирование и технология клеевых соединений: тенденции и контроль качества

Проектирование клеевого соединения – это выбор не только материала клея, но и геометрии шва, подготовки поверхности и процесса сборки. Современные тенденции развития клеевой сборки включают развитие средств автоматизации дозирования, повышение повторяемости толщины шва, применение методов контроля и трассируемости параметров процесса [3]. Для корпусных узлов смартфона это напрямую связано с повторяемостью герметизации по контуру: неоднородная толщина шва приводит к локальным зонам недожата уплотнения и к концентрациям напряжений по краям шва.

#### 5 Прочность клеевых узлов и интерпретация испытаний: роль концентраций напряжений

Сравнение «прочности клея» по стандартному образцу с реальной прочностью узла корпуса часто некорректно из-за различия напряженного состояния и наличия сингулярности в зонах перехода материалов и условий контакта. В работе Н.В. Севодиной и А.Ю. Федорова проведен численный анализ напряженного состояния в образцах, используемых для испытаний клеевых соединений, и показано, что геометрия вблизи «особых точек» существенно влияет на характер концентраций напряжений и на интерпретацию результатов [6].

Для корпуса смартфона это означает: наиболее опасны края клеевого шва у стеклянной панели, углы рамки, зоны прерывания шва, а также места, где клеевой шов соседствует с контактными (неприлипшим) участком. Основные критерии отказа на уровне узла: риск отслоения по адгезионной границе, когезионный разрыв клея, трещинообразование в хрупком элементе (стекле) и потеря герметичности по контуру.

#### 6 Герметизация: прокладки, контактное давление и ресурс

Герметичность корпуса определяется контактным давлением и формоизменением уплотняющего элемента, а также стабильностью этих параметров во времени. В работе О.А. Мамаева и соавт. на примере радиального герметизирующего устройства показано, что анализ эпюр НДС и расчетных зависимостей напряжений и деформаций от свойств материалов и условий эксплуатации позволяет повышать надежность конструкции; среди ключевых параметров выделено контактное давление [2].

Ресурс герметизирующего узла определяется не только начальной герметичностью, но и эволюцией формы/износа и изменением параметров при фрикционном взаимодействии. Методика прогнозирования надежности и ресурса подвижных герметизирующих устройств подчеркивает необходимость учитывать изменение герметичности и напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации [7]. Для смартфонов логика переносится как общая: уплотнение и клеевой контур должны сохранять прижатие и геометрию при циклах нагрева/охлаждения, при изгибах корпуса и при ударах.

#### 7 Термомеханика разнородных соединений

Разнородность материалов (металл, полимер, стекло, клей) приводит к несогласованию коэффициентов линейного термического расширения (ТКЛР). При температурных циклах возникают дополнительные напряжения в хрупких элементах и сдвиговые напряжения в клеевом слое. В работе А.И. Погалова и соавт. выполнено моделирование НДС соединений в микроразнообразных модулях, показана роль свойств материалов и приведены рекомендации по толщине клеевого шва (порядка десятков сотен микрон) как фактору снижения напряжений и повышения долговечности [8].

Хотя микроразнообразный модуль и корпус смартфона различаются масштабом, физика разнородного соединения одинакова: чем выше жесткость и хрупкость одного из элементов (стекло), тем выше требования к прослойке (клей/герметик). Для изделий, подвергаемых импульсным нагрузкам, также подчеркивается важность корректного соединения разнородных материалов как фактора работоспособности при ударе [1].



Типовые виды отказов в соединениях корпуса смартфона  
и инженерные критерии оценки

Таблица 1

| № | Узел                       | Вид отказа                | Критерий/признак                                    | Типовые причины                              |
|---|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1 | Стекло-клей-рама           | Отслоение;<br>трещина     | $\sigma$ в стекле; $\tau$ в клее;<br>края шва       | Концентрации в<br>углах; $\Delta T$ ; удар   |
| 2 | Крышка-рама +<br>прокладка | Течь/потеря<br>IP         | Контактное давление;<br>зоны недожата               | Неравн. толщина;<br>прогиб корпуса           |
| 3 | Стойки/винты               | Разрушение/<br>ползучесть | $\sigma$ вокруг отверстий;<br>остаточная деформация | Локальная<br>жесткость;<br>старение полимера |

#### Закключение

Надежность корпуса смартфона в значительной степени определяется узлами соединений и герметизации. Для клеевых соединений критичны: адгезия, толщина и геометрия шва, качество подготовки поверхности и устойчивость свойств при старении. Для герметизации ключевыми параметрами выступают контактное давление и его стабильность при деформациях и температурных циклах. Для разнородных стыков металл-клей-стекло существенную роль играет несогласование ТКЛР; увеличение требований к прослойке и оптимизация толщины клеевого слоя позволяют снижать термонапряжения и повышать долговечность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриневич А.В., Петрова А.П. Соединение разнородных материалов для деталей, подверженных импульсным нагрузкам. ВИАМ/2013-Тр-10-05. 2013.
2. Мамаев О.А., Кропотин О.В., Байбарацкий А.А. Разработка и анализ напряженно-деформированного состояния элементов герметизирующих устройств с использованием метода конечных элементов // Омский научный вестник. 2010. № 3(93).
3. Игнатов А.В. Новые тенденции развития сборки клеевых соединений в машиностроении. 2011. № 10.
4. Калинин М.Л., Александров В.М. Классификация клеящих материалов и их выбор для промышленного использования // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 2(51).
5. Шарова И.А., Петрова А.П. Обзор по материалам международной конференции по клеям и герметикам (WAS-2012, Франция). ВИАМ/2013-Тр-08-06. 2013.
6. Севодина Н.В., Федоров А.Ю. Совершенствование методов определения прочности клеевых соединений на основе численного моделирования // Вестник Пермского научного центра. 2014. № 2.
7. Кропотин О.В. Методика прогнозирования надежности и ресурса подвижных герметизирующих устройств с учетом формоизменения элементов в процессе фрикционного взаимодействия. 2012. (Сборник «Современные технологии в промышленности, строительстве и на транспорте»).
8. Погалов А.И., Титов А.Ю., Тимошенко С.П. Термомеханическая прочность соединений элементов в микросистемных модулях // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 6. С. 565-572. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-565-572.

УДК 621.396.6:678.5:666.1:669.71

**Желнаков<sup>1</sup> К.А., Трусов<sup>2</sup> В.А.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## **МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СМАРТФОНОВ: ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ, АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, УПРОЧНЕННЫЕ СТЕКЛА И ЭМС-ЗАЩИТА (ОБЗОР)**

**Аннотация.** Выполнен обзор материалов и покрытий, применяемых в корпусных элементах современных смартфонов. Рассмотрены поликарбонат и сплавы ПК/АБС, подходы к повышению их технологичности и пожаробезопасности, алюминиевые сплавы и анодные оксидные пленки, а также методы упрочнения тонких стекол (термохимическое упрочнение/ионный обмен). Отдельно обсуждены материалы и покрытия для защиты от электромагнитного излучения и требования ЭМС. Обзор ориентирован на подготовку исходных данных для виртуальных испытаний и обоснование выбора материалов при проектировании корпуса.

**Ключевые слова:** смартфон, корпус, поликарбонат, ПК/АБС, анодирование, анодный оксид алюминия, термохимическое упрочнение, ионный обмен, радиопоглощающие материалы, электромагнитное экранирование

**Zheltnakov<sup>1</sup> K.A., Trusov<sup>2</sup> V.A.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## **MATERIALS AND COATINGS OF SMARTPHONE BODY ELEMENTS: POLYMER COMPOSITIONS, ALUMINIUM ALLOYS, HARDENED GLASS AND EMC PROTECTION (OVERVIEW)**

**Abstract.** The article provides an overview of the materials and coatings used in the housing elements of modern smartphones. It discusses polycarbonate and PC/ABS alloys, approaches to improving their processability and fire safety, aluminum alloys and anodic oxide films, as well as methods for strengthening thin glasses (thermochemical strengthening/ion exchange). The article also discusses materials and coatings for electromagnetic radiation protection and EMC requirements. The review focuses on preparing initial data for virtual testing and justifying the selection of materials during the design of the housing.

**Keywords:** smartphone, case, polycarbonate, PC/ABS, anodizing, anodic aluminum oxide, thermochemical hardening, ion exchange, radio-absorbing materials, electromagnetic shielding

### **Введение**

Корпус смартфона является многоматериальной конструкцией, которая одновременно выполняет функции несущего каркаса, защиты электроники от ударов/изгиба, теплоотвода, декоративного покрытия и элемента электромагнитной совместимости (ЭМС). Современная практика проектирования опирается на сочетание металлов, полимеров, стекла и клеевых/уплотнительных материалов; поэтому выбор материала нельзя сводить к соотношению «цена-качество» – он должен учитывать технологию изготовления, радиопрозрачность, долговечность и требуемые испытания на соответствие стандартам.

1 Критерии и требования к материалам корпусных элементов

Функциям корпуса и рамки смартфона предъявляют совокупность требований:

1) механические – жесткость и ударопрочность, снижение концентраций напряжений в вырезах и крепежных зонах;

2) технологические – литье/обработка, стабильность размеров и низкая усадка;

3) эксплуатационные – стойкость к истиранию, коррозии, воздействию пота/косметики;

4) термомеханические – работа при циклических температурах и минимизация термонапряжений на стыках стекло-рамка;

5) радиотехнические – прозрачность для антенн и обеспеченность ЭМС.

2 Полимерные материалы: поликарбонат и сплавы ПК/АБС

Поликарбонат (ПК) – конструкционный термопласт с высоким уровнем ударной вязкости и жесткости, однако его применение ограничивают высокая вязкость расплава и узкий температурный интервал переработки, что осложняет литье тонкостенных деталей [2]. В работах по модификации ПК показано, что введение добавок/совместителей и подбор рецептуры позволяют направленно изменять технологичность и пожаробезопасность (например, за счет антипиренов и совместителей) при сохранении уровня механических свойств [2].

Перспективным для корпусов и рамок (включая элементы, не требующие высокой теплопроводности) является сплав ПК/АБС, сочетающий ударопрочность и технологичность. На примере разработки ударопрочной композиции АБС/ПК показано, что соотношение компонентов и подбор марок полимеров существенно влияют на комплекс физико-механических и технологических свойств [3]. Для тонкостенных деталей важна размерная стабильность: наполненные композиции на основе ПК могут снижать усадку и повышать стабильность геометрии, что критично для посадочных мест дисплея и внутренних рамок [1].

Ключевые требования к материалам корпуса смартфона

Таблица 1

| Группа требований | Содержание                                                               | Типовая метрика/проверка                    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Механические      | Ударопрочность, жесткость, трещиностойкость; устойчивость к изгибу рамки | Статический изгиб, падение/удар (CAE)       |
| Технологические   | Переработка, вязкость расплава, интервал переработки, усадка             | Литье под давлением, оценка ПТР [1,2]       |
| Поверхностные     | Износостойкость, декоративность, адгезия покрытий                        | Твердость/истирание, адгезия покрытий [4]   |
| Коррозионные      | Стойкость металлов и покрытий к коррозии и поту                          | Испытания/модели коррозии; анодирование [4] |
| Термомеханические | ТКЛР, релаксация напряжений, стабильность при нагреве/охлаждении         | Тепловой цикл, термонапряжения [6-8]        |
| Радиотехнические  | Влияние материалов на работу антенн, экранирование/поглощение            | Параметры ЭМС и отражения [9-11]            |

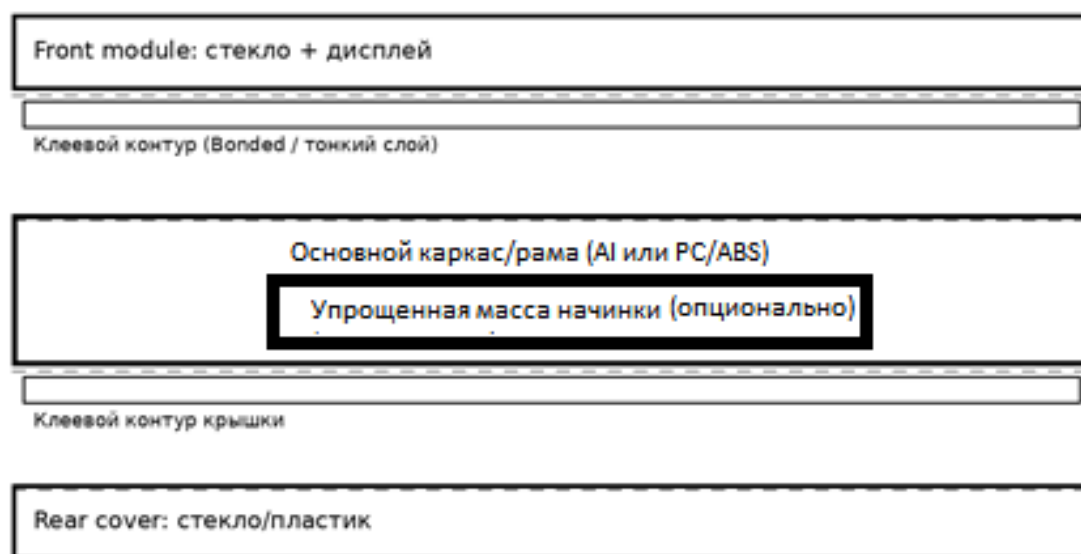


Рисунок 1 - Типовая архитектура корпуса смартфона (каркас-рамка-стекло-крышка)

Для инженерной постановки виртуальных задач полимерную часть корпуса целесообразно моделировать как изотропный упруго-вязко-пластический материал с температурной зависимостью модуля и учитывать особенности:

- 1) ползучесть при длительных нагрузках;
  - 2) локальные концентраторы напряжений (окна под динамик/разъемы);
  - 3) контактные зоны с вклейками дисплея.
- 3 Металлы и покрытия: алюминий и анодные оксидные пленки

Алюминиевые сплавы широко применяются в несущих рамах (mid-frame) благодаря высокой удельной жесткости и теплопроводности. В то же время долговечность и внешний вид таких деталей критически зависят от состояния поверхности. Анодное оксидирование формирует пористую оксидную пленку с регулируемыми параметрами (толщина, пористость, шероховатость), пригодную как для защиты от коррозии/истирания, так и как подслой для последующих покрытий [4]. В работе [4] показана возможность подбора режимов анодирования и устойчивость анодной пленки в ряде электролитов гальванических процессов.

Строение анодных пленок и механизм включения анионов электролита в структуру рассматриваются в [5], где анодный оксид трактуется как сложная структура со «структурными анионами» и зависимостью свойств пленок от электролита и режима анодирования. При этом поверхность металла может иметь существенно отличающиеся характеристики (адгезия, микрогеометрия) при одинаковой «марке алюминия», если процессы подготовки/анодирования различаются.

| Материал            | Сильные стороны                                       | Ограничения                                             | Типовые зоны                          | Опора на источники |
|---------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| ПК / наполненный ПК | Ударопрочность, стабильность размеров при модификации | Сложность переработки, чувствительность к УФ            | внутренняя рамка, элементы крепежа    | [1, 2]             |
| ПК/АВС              | Технологичность + ударопрочность                      | Меньшая теплостойкость vs металл; горючесть без добавок | крышки/рамки, декоративные элементы   | [2, 3]             |
| Al + анодирование   | Жесткость, теплоотвод, премиальный вид                | Экранирование антенн, риск коррозии без покрытия        | шасси, ребра жесткости, основная рама | [4, 5]             |

Продолжение таблицы 2

|                    |                                           |                                       |                                           |        |
|--------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|--------|
| Упрочненное стекло | Жесткая защитная поверхность, оптика      | Хрупкость, термонапряжения на стыках  | дисплей, задняя крышка                    | [6–8]  |
| ЭМИ-экраны/РППМ    | Снижение помех и отражений, повышение ЭМС | Зависимость от частоты и толщины слоя | внутренние экраны, зоны вокруг RF-модулей | [9–11] |

#### 4 Стекла и методы упрочнения: ионный обмен и термохимическое упрочнение

Фронтальная панель и задняя крышка смартфона в массовых конструкциях выполняются из тонкого листового стекла, прочность которого в реальных условиях определяется дефектами поверхности. Для повышения прочности применяют низкотемпературный ионный обмен (термохимическое упрочнение), создающий поверхностные сжимающие напряжения [6, 7].

Для боросиликатных стекол показано, что ионообменная обработка в расплаве  $KNO_3$  при подобранных режимах может увеличить предел прочности при изгибе до трех раз, а глубина замещения  $Na^+ \rightarrow K^+$  в поверхностном слое достигает сотен нанометров в зависимости от режима [6]. Для литий-алюмосиликатных стекол продемонстрирована возможность формирования напряженного слоя глубиной до сотен микрон; предложен экономически эффективный режим термохимической обработки (например, 450 °C и 24 часа) [7]. Для тонких листовых стекол (толщина < 2 мм) ионный обмен в расплаве  $KNO_3$  при 400–500 °C обеспечивает рост прочности и микротвердости, при этом диффузия  $K^+$  в поверхностный слой может составлять порядка 10–15 мкм [8].

#### 5 Материалы и покрытия для ЭМС: экранирование и радиопоглощение

Помимо механики, корпус влияет на электромагнитную среду внутри устройства: металлические рамки и экраны могут, как снижать уровень помех, так и ухудшать работу антенн при неудачном расположении. В обзорной работе Меньшова С.Б. по радиопоглощающим материалам и покрытиям выделяются ключевые механизмы увеличения поглощения электромагнитной энергии: рост диэлектрических и магнитных потерь, согласование волновых сопротивлений, интерференционные эффекты и резонансные явления в ферритах [9].

Для гибких многослойных экранов, где слои формируются из волокнистых материалов с магнитными включениями и промежуточных диэлектриков, показана зависимость экранирующих характеристик от состава слоев в диапазоне гигагерцовых частот; отмечено снижение коэффициента отражения до значений порядка -18...-4 дБ в зависимости от режима согласования [10]. Для измерительных задач и калибровок важны модели влияния коэффициента отражения материалов и размеров камеры на точность антенных измерений, что рассмотрено для малогабаритных экранированных камер из композитных радиопоглощающих материалов [11].

#### 6 Инженерные выводы для виртуальных испытаний

На основе рассмотренных источников можно сформировать вычислительные постановки, не требующие натурных испытаний:

- 1) статический изгиб рамки (Al vs ПК/АВС) с оценкой прогиба и максимальных напряжений;
- 2) локальный удар/падение на угол – сравнение концентраций напряжений в стекле при разных условиях закрепления;
- 3) термонапряжения в узле стекло-рамка при перепаде температур с учетом ТКЛР материалов (рисунок 3);
- 4) упрощенная ЭМС-постановка на уровне отражения/поглощения слоев по параметрам из [9–11] (например, оценка тренда влияния слоистости и потерь).

При выборе АВС/ПК, как материала рамки или крышки (радиопрозрачные зоны), имеет смысл моделировать его в качестве базового материала для «окон антенн»,

а алюминиевую рамку – как несущий теплопроводный каркас, разделенный неметаллическими вставками. Такой компромисс соответствует широко встречающейся архитектуре современных аппаратов и согласуется с требованиями ЭМС и механики.

Примеры технологических режимов, полезных для постановки моделей Таблица 3

| Процесс                     | Суть                                                   | Ориентировочные параметры из источников                                           | Источник |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Модификация ПК              | Повышение технологичности/пожаробезопасности добавками | Описаны модификаторы ABS/PBT и антипирены; контроль ПТР и горючести               | [2]      |
| Сплав ПК/АБС                | Подбор соотношения для ударопрочности и переработки    | Пример рецептуры и анализ влияния соотношений компонентов на свойства             | [3]      |
| Анодирование Al             | Оксидная пленка как защитный/адгезионный подслои       | Электролиты на основе $H_3PO_4$ и $H_2SO_4$ ; зависимость толщины от тока/времени | [4]      |
| Ионный обмен стекла         | $Na^+ \rightarrow K^+$ создаёт сжимающие напряжения    | Для LAS: режим 450 °C, 24 ч, глубина слоя до ~600 мкм                             | [7]      |
| Ионный обмен тонкого стекла | Упрочнение листового стекла тонких номиналов           | $KNO_3$ , 400–500 °C; диффузия $K^+$ на глубину ~10–15 мкм                        | [8]      |

#### Заключение

Многоматериальная природа корпуса смартфона делает выбор материалов задачей компромиссов между механикой, технологичностью, долговечностью и ЭМС. Поликарбонат и сплавы ПК/АБС удобны для радиопрозрачных и тонкостенных элементов при условии модификации рецептуры и учета особенностей переработки [1–3]. Алюминиевые рамки требуют управляемых поверхностных слоев, среди которых анодное оксидирование обеспечивает регулируемую структуру и адгезионные свойства [4,5]. Для стеклянных панелей ключевым является термохимическое упрочнение (ионный обмен), позволяющее формировать напряженный слой различной глубины в зависимости от состава стекла и режима обработки [6–8]. ЭМС-аспекты целесообразно учитывать на этапе проектирования, опираясь на представления о радиопоглощении и экранировании слоистыми материалами [9–11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Редькина А.А., Запорников В.А., Осипчик В.С., Кочетков А.И., Кладовщикова О.И. Исследование свойств наполненного поликарбоната с улучшенными технологическими характеристиками // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. XXVIII. № 3.
2. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Бейдер Э.Я. Влияние модифицирующих добавок на пожаробезопасные свойства и технологичность поликарбоната // Труды ВИАМ. 2013. № 6 (ВИАМ/2013-Тр-06-06).
3. Ягрусина И.Н., Дюльдина М.В., Ногачев А.Г., Якунин К.П. Разработка состава ударопрочной полимерной композиции АБС/ПК для автомобильной промышленности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-80-88.
4. Девяткина Т.И., Спасская М.М., Москвичев А.Н., Рогожин В.В., Михаленко М.Г. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов для получения качественных гальванических покрытий // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 4(1). С. 109–114.
5. Вихарев А.В., Вихарев А.А. Особенности строения и механизм формирования анодных оксидов алюминия // Ползуновский вестник. 2010. № 3.
6. Липатев А.С., Плотникова А.С., Спиридонов Ю.А., Лотарев С.В., Мамаджанова Е.Х., Сигаев В.Н. Ионнообменное упрочнение боросиликатных стекол в калиевой селитре и хлориде алюминия // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. XXVII. № 5.
7. Мартюхова Д.А., Гудкова А.В., Михайленко Н.Ю. Исследование напряженного состояния термохимически упрочненных литийалюмосиликатных стекол // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. XXXI. № 3.
8. Павлюкевич Ю.Г., Кравчук А.П. Получение упрочненных листовых стекол тонких номиналов // Труды БГТУ. 2015. № 3. Химия и технология неорганических веществ.
9. Меньшова С.В. Материалы и покрытия для защиты от электромагнитного излучения (обзор) // Инжиниринг и технологии. 2017. Vol. 2(1). DOI: 10.21685/2587-7704-2017-2-1-2.
10. Ахмед А.А.А., Пулко Т.А., Насонова Н.В., Лыньков Л.М. Гибкие многослойные конструкции экранов электромагнитного излучения // Доклады БГУИР. 2015. № 5(91).
11. Богущ В.А., Касперович М.М. Точность антенных измерений в малогабаритной камере из композиционных радиопоглощающих материалов в СВЧ- и КВЧ-диапазонах длин волн // Доклады БГУИР. 2011. № 2(56).

**Целикин<sup>1</sup> К. Д.**

<sup>1</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> kdts777@yandex.ru

## **ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ НА ОСНОВЕ ВСТРОЕННОГО ЦИФРОВОГО КОНТУРА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ**

**Аннотация.** Волновые твердотельные гироскопы (ВТГ) представляют собой перспективный класс современных инерциальных приборов, в состав которых входят четыре нелинейные системы автоматического управления режимами его работы с перекрестными связями по входам и выходам. Технические характеристики гироскопов в этом случае зависят от эффективности решения задач синхронизации работы указанных систем, а также решения специфических проблем ВТГ, связанных с естественным изменением частот возбуждения и измерения резонаторов в сложных условиях эксплуатации. Работа посвящена анализу результатов экспериментального исследования режимов работы цифровой фазовой автоподстройки частоты при управлении измерительными сигналами и приводами гироскопа. Подтверждены сохранение работоспособности датчика при включении питания и скачке частоты возбуждения резонатора до  $\pm 20$  Гц, а также высокая точность ее отслеживания при изменении температуры окружающей среды в пределах от минус 40 до 60 °С с одновременной возможностью исключения из структуры гироскопа микросхемы цифрового датчика температуры, используемого в целях реализации запуска.

**Ключевые слова:** волновой твердотельный гироскоп, фазовая автоподстройка частоты, программируемая логическая интегральная схема, навигация, система управления, бесплатформенная инерциальная навигационная система, PID-регулятор

**Tselikin<sup>1</sup> K. D.**

<sup>1</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

<sup>1</sup> kdts777@yandex.ru

## **ON THE PECULIARITIES OF REGULATING THE CHARACTERISTICS OF WAVE SOLID-STATE GYROSCOPES BASED ON A BUILT-IN DIGITAL PHASE-LOCKED LOOP**

**Abstract.** Wave solid-state gyroscopes (WSG) are a promising class of modern inertial instruments, which include four nonlinear automatic control systems for its operation modes with cross-connections on inputs and outputs. The technical characteristics of gyroscopes in this case depend on the effectiveness of solving the synchronization tasks of the operation of these systems, as well as solving specific problems of WSG related to the natural change in excitation and measurement frequencies of resonators in difficult operating conditions. The proposed article is devoted to the analysis of the results of an experimental study of the modes of operation of digital phase-locked loop (PLL) in the control of measurement signals and drives of the gyroscope. The preservation of the sensor's operability when power is turned on and the excitation frequency of the resonator jumps up to  $\pm 20$  Hz, as well as the high accuracy of its tracking when the ambient temperature changes within the range of minus 40 to 60 °C, with the simultaneous possibility of excluding the digital temperature sensor chip from the structure of the gyroscope, used in order to implement the launch.

**Keywords:** wave solid-state gyroscope, phase-locked loop, programmable logic integrated circuit, navigation, control system, platform-free inertial navigation system, PID controller

**Введение.** Основными узлами ВТГ являются резонатор с двумя степенями свободы и четыре нелинейных систем автоматического управления режимами его работы с перекрестными связями по входам и выходам:

- стабилизации амплитуды и энергии колебаний;
- компенсации измеряемой угловой скорости;
- компенсации квадратуры;
- компенсации фазы.

Для синхронизации работы перечисленных систем в современных ВТГ используется полностью цифровой контур ФАПЧ (*Software Phase-Locked Loop, SPLL*), являющийся наиболее эффективным инструментом управления [1-3]. Для оптимизации сложных процессов управления оптимальным является использование программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), обладающих значительными возможностями миниатюризации и выполнения аппаратной части гироскопа, включая *SPLL*, в виде программных средств.

Кроме обеспечения нормального функционирования систем управления с учетом известной значимой зависимости частоты колебаний резонатора от изменения температуры окружающей среды [4], в задачи *SPLL* также входят:

- захват и отслеживание изменяющейся частоты резонатора в пределах не менее  $\pm 20$  Гц;
- обеспечение запуска датчика при скачкообразном изменении частоты резонанса в тех же пределах, как правило, возникающем при включении питания гироскопа, когда его эксплуатация начинается после длительного воздействия предельных значений температур.

При разработке ВТГ определено также влияние параметров *SPLL* на устойчивость систем управления и температурные характеристики устройства в целом.

**Материалы и методы.** На рис. 1 представлена структурная схема *SPLL*, которая содержит хорошо известные узлы - фазовый детектор (ФД), совмещенный с цифровым

КИХ-фильтром, цифровой пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (PID-регулятор), генератор, управляемый напряжением (ГУН), а также цепь отрицательной обратной связи (ООС), формирующая сигналы компенсации изменений входной фазы [5, 6]. Чаще всего ГУН выполняется на основе известного алгоритма CORDIC.

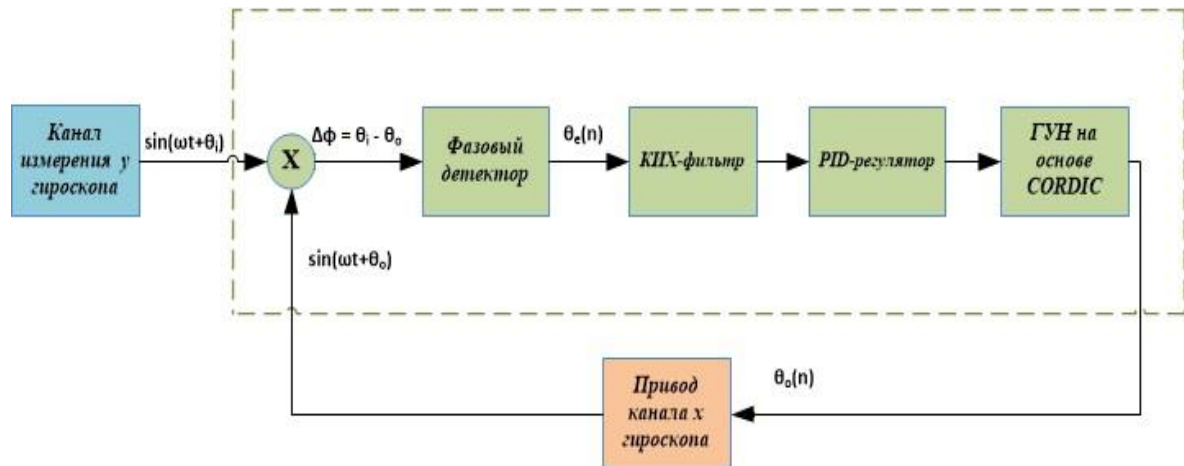


Рисунок 1 – Структурная схема SPLL

В состав ГУН также входит фазовый аккумулятор, в который перед началом регулирования заносится эталонное значение резонансной частоты гироскопа, определяемое на этапе изготовления чувствительного элемента. Это значение является исходной точкой для определения диапазона захвата SPLL и реакции на скачок частоты, для чего эта проблема решается введением в аккумулятор фазы SPLL специальной таблицы, содержащей информацию об отклонениях частоты колебаний от ее эталонного значения.

Работа SPLL начинается с определения фазовой ошибки в ФД, которая преобразовывается в цифровом КИХ-фильтре в электрическое напряжение пропорциональное разности  $\theta_i - \theta_o$ , затем усиливается в цифровом PID-регуляторе, поступает на вход ГУН, а затем на управляющий привод датчика, регулирующий ошибку отслеживания до состояния  $U_e = \min$ .

SPLL для гироскопа отличается от обычных методов их построения также тем, что его входом является выход измерительного канала y гироскопа, а в цепь ООС включается канал x его привода.

Так как SPLL является устройством с ООС, для него актуально обеспечение границ собственного устойчивого состояния. Эта задача решается изменением параметров PID-регулятора, функция преобразования которого имеет вид разностного уравнения

$$u(n) = u[n-1] + k_1 e[n] + k_2 e[n-1] + k_3 e[n-2],$$

где  $k_1 = k_p + k_i + k_d$ , а  $k_2 = -(k_p + 2 \cdot k_d)$ ,  $k_3 = k_d$

Здесь  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – регулируемые коэффициенты PID, а  $k_p$ ,  $k_i$  и  $k_d$  – его пропорциональный, интегральный и дифференцирующий коэффициенты. Подбор значений  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  является сложной технической задачей, взаимосвязанной с процедурой выбора аналогичных параметров PID-регуляторов каждой из систем управления. Определено, что при выборе коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  по критериям минимизации погрешности отслеживания частоты резонатора позволило решить задачу устойчивости гироскопа в целом к скачку частоты без использования упомянутой выше таблицы.

**Результаты.** Как показывает практика разработки ВТГ выполнение традиционных требований к SPLL является необходимым, но недостаточным условием в связи с использованием в них выходных сигналов канала y измерений и привода x гироскопа, влияющих на качество выполнения функций SPLL и гироскопа. В этой связи поиск их оптимального взаимодействия при исходной работоспособности каждого из узлов носит итерационный характер, для которого необходим контроль их параметров при воздействии одного из основных влияющих факторов – изменения температуры окружающей среды.

На рисунках 2–4 для реального ВТГ с начальной частотой 6143,438 Гц приведены графики процесса отслеживания резонансной частоты при наличии вибрации основания, проявляющей себя в виде периодических всплесков.

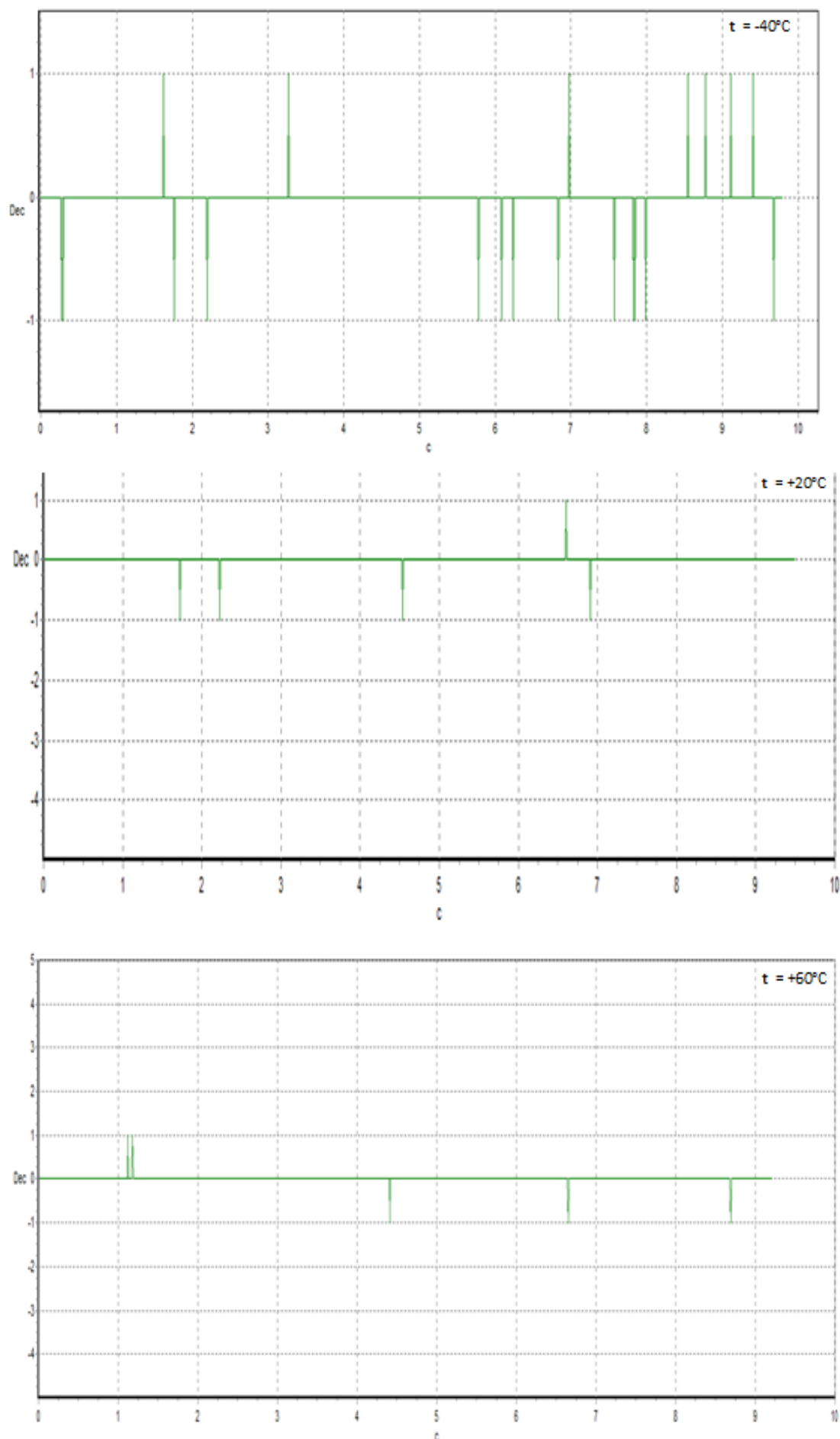


Рисунок 2 – Выходной сигнал фазового детектора при различных температурах окружающей среды



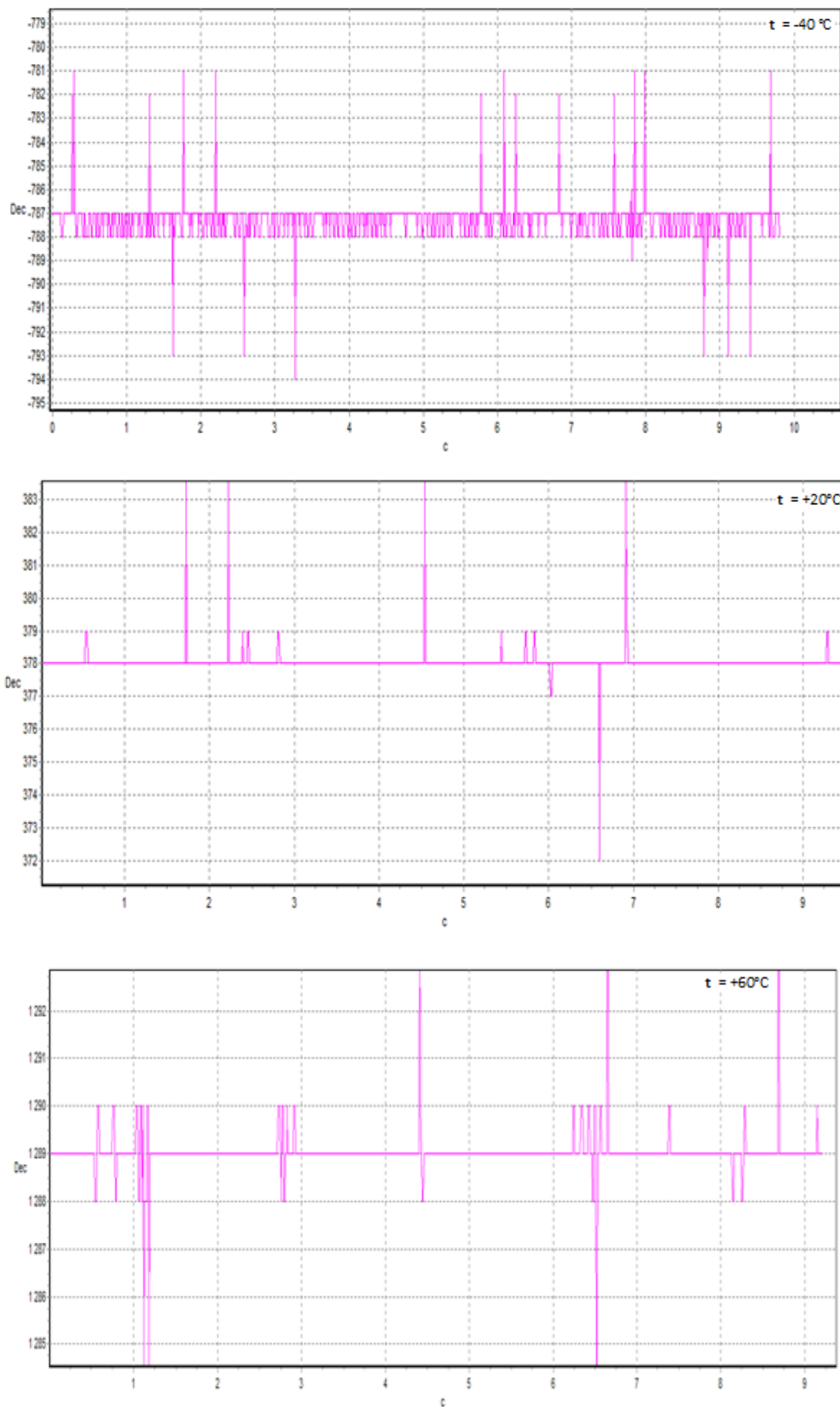


Рисунок 3 – Выходной сигнал *PID*-регулятора, изменяющийся при изменении разностной частоты резонатора и различных температурах окружающей среды

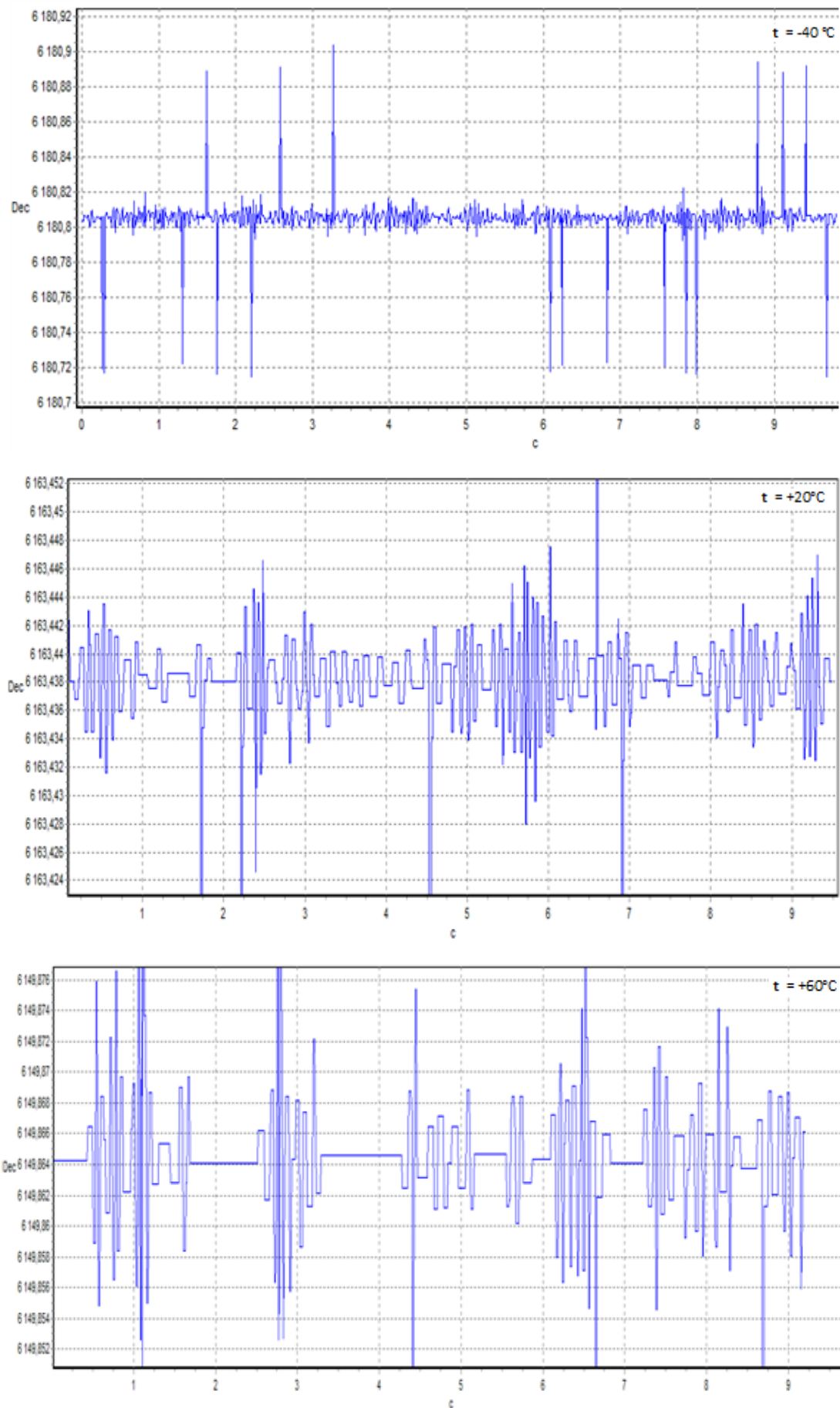


Рисунок 4 – Выходной сигнал ГВН, отслеживающий изменения резонансной частоты при различных температурах окружающей среды

Из рисунков видно, что изменения выходного сигнала ФД и  $PID$ -регулятора не выходят за пределы  $\pm 1$  единицы младшего разряда 16 разрядного кода, из чего можно сделать вывод о том, что их функционирование не зависит от изменения температуры

окружающей среды. А погрешность отслеживания частоты, изменяющейся в пределах от 6149,8 до 6180,8 Гц, не превышает 0,4 Гц.

**Заключение.** В заключение следует отметить, что отработка аппаратных и программных решений по реализации *SPLL* обеспечила возможности повышения эффективности работ систем управления ВТГ, следствием которой стало значительное повышение стабильности их работы в условиях эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Park S.-J., Yong K.R., Lee Y.Y. Phase control loop design based on second-order PLL loop filter for solid-type high Q-factor resonant gyroscope. 2019.
2. Mao X., Yang H., Wang H. Behavioral modeling and simulation of jitter noise in fractional-N PLL frequency synthesis. 2004.
3. Zhao J., Huang M., Zha X. Non-linear analysis of PLL damping characteristics in weak-grid-tied inverters. 2020.
4. Lindsey W.C., Chie C.M. A survey of digital phase locked loops. 1981.
5. Park S.J., Song J.W., Yun S.H. Oscillation control loop design for amplitude-controlled, frequency read-out-type resonant sensors. 2010.
6. Park S.S. Frequency and amplitude control of micro resonant sensors. 2009.
7. Кузнецов Н. В., Беляев Я. В., Стяжкина А. В., Тулаев А. Т., Юлдашев М. В., Юлдашев Р. В. Оценка влияния архитектуры ФАПЧ на характеристики микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 1. С. 73–83.
8. Лукин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технологии: монография. Москва: Радиотехника, 2014. 176 с.
9. Николаев А. В., Папко А. А., Поспелов А. В. Разработка алгоритмов управления режимами работы резонатора волновых твердотельных гироскопов на основе совокупности методов усреднения и анализа измерительных цепей // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. Т. 1. С. 88–91.
10. Толеген А., Керимбаев А., Ергалиев Д. С., Бимбетова М. Методы повышения эффективности перспективных систем навигации // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2022. Т. 1. С. 6–8.
11. Целикин К. Д., Маркелов М. К. Волновой твердотельный гироскоп и его система управления // Вестник Пензенского государственного университета. 2022. № 4(40). С. 109–118.
12. Carlosena A., Manuel-Lazaro A. General method of phase-locked loop filter analysis and design. 2008.

УДК 662.756.3

**Маликова<sup>1</sup> А.Қ. Ергалиев<sup>2</sup> Д.С., Жандилдинова<sup>3</sup> К.М.**

<sup>1,2,3</sup> Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

<sup>1</sup> a.malikova@std.agakaz.kz

<sup>2</sup> d.yergaliyev@agakaz.kz

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА AIRBUS A320**

**Аннотация.** Представлен теоретический сравнительный анализ традиционных детерминированных и перспективных нейросетевых методов контроля технического состояния противопожарной системы самолёта Airbus A320. Рассматриваются архитектура системы, принципы работы детекторов, типовые отказы и ограничения существующих методов диагностики. Если предположить, что система эксплуатируется в условиях высоких вибраций и значительных перепадов температур, то классические детерминированные методы диагностики демонстрируют недостаточную эффективность, особенно применительно к так называемым «плавающим» дефектам. Моделирование показывает, что нейросетевые методы, основанные на анализе трендов и корреляций, способны снизить долю ложных срабатываний и обеспечить прогнозирование остаточного ресурса компонентов системы. Рассмотрены архитектура противопожарной системы A320, принципы работы пневматических детекторов пожара, логика работы блока FDU, а также типовые отказы, с которыми сталкиваются эксплуатанты. Выяснено, что основными проблемами являются температурная зависимость характеристик детекторов, нестабильность электрических контактов в условиях вибрации и невозможность прогнозирования отказов детерминированными методами. Предположено, что наиболее эффективным решением является гибридный подход, сочетающий сертифицируемость детерминированных методов с прогностической силой нейросетей. В заключительной части предложена структура такого гибридного подхода и обсуждены перспективы его внедрения.

**Ключевые слова:** противопожарная система, Airbus A320, детерминированный метод, нейросеть, диагностика, прогнозирование отказов, FDU, пневматический детектор, гибридный подход, техническое обслуживание

**Malikova<sup>1</sup> A.K., Yergaliyev<sup>2</sup> D.S., Zhandildinova<sup>3</sup> K.M.**

<sup>1,2,3</sup> Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan

<sup>1</sup> a.malikova@std.agakaz.kz

<sup>2</sup> d.yergaliyev@agakaz.kz

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF DETERMINISTIC AND NEURAL NETWORK METHODS FOR TECHNICAL CONDITION MONITORING OF THE AIRCRAFT FIRE PROTECTION SYSTEM OF THE AIRBUS A320**

**Abstract.** This paper presents a theoretical comparative analysis of conventional deterministic and advanced neural network-based methods for monitoring the technical condition of the aircraft fire protection system of the Airbus A320. The system architecture, detector operating principles, typical failures, and limitations of existing diagnostic methods are considered. Assuming that the system is operated under conditions of high vibration and significant temperature variations, classical deterministic diagnostic methods demonstrate insufficient effectiveness, particularly in relation to so-called "intermittent" faults. Modeling shows that neural network-based methods, relying on trend and correlation analysis, are capable of reducing the rate of false warnings and enabling prediction of the remaining useful life of system components. The paper provides a detailed review of the A320 fire protection system architecture, the operating principles of pneumatic fire detectors, the functional logic of the FDU, as well as typical failures encountered by operators. It was determined that the main issues include temperature dependence of detector characteristics, instability of electrical contacts under vibration conditions, and the inability to predict failures using deterministic methods. It is assumed that the most effective solution is a hybrid approach combining the certifiability of deterministic methods with the predictive capability of neural networks. The final section of the paper proposes the structure of such a hybrid approach and discusses the prospects for its implementation.

**Keywords:** fire protection system, Airbus A320, deterministic method, neural network, diagnostics, failure prediction, FDU, pneumatic detector, hybrid approach, maintenance

**Введение.** В представленной работе мы разберем вопрос, касающийся методов контроля технического состояния противопожарной системы воздушного судна Airbus A320. Этот тип самолёта является одним из наиболее распространённых в мире: по состоянию на 2024 год построено более 10 000 экземпляров семейства A320, и они эксплуатируются сотнями авиакомпаний по всему миру. Отказ противопожарной системы относится к категории систем критического уровня безопасности (Level A по классификации SAE ARP4754), поскольку необнаруженный пожар в двигателе или вспомогательной силовой установке может привести к катастрофическим последствиям, включая потерю воздушного судна и гибель людей [1].

В процессе мы разберем саму противопожарную систему, затронем вопросы о её техническом обслуживании и технических особенностях. Проверяя статистику эксплуатации, опубликованную в директивах лётной годности EASA и FAA, а также в отчётах SKYbrary и Aviation Herald, я выяснила, что значительная часть отказов системы (по некоторым оценкам, до 15–20%) являются так называемыми «плавающими» дефектами [2]. Эти дефекты проявляются в полёте (например, на эшелоне при определённых температурных условиях или уровнях вибрации), но полностью исчезают при наземном обслуживании, когда инженеры пытаются их локализовать. Такая

ситуация приводит к многократным заменам компонентов наугад, увеличению времени простоя воздушного судна и росту эксплуатационных расходов.

Я предположила, что внедрение нейросетевых методов диагностики может кардинально изменить эту ситуацию. Если предположить, что мы сможем анализировать не только дискретные сигналы «исправен/неисправен», но и непрерывные тренды изменения параметров (сопротивление изоляции, время срабатывания, форма сигнала), то открывается возможность прогнозирования отказов задолго до их фактического возникновения [3]. Моделирование показывает, что такой подход позволяет перейти от реактивной стратегии технического обслуживания (ремонт по факту отказа) к прогностической (Prognostics and Health Management – PHM), что даёт существенный экономический эффект.

Однако, если пренебречь требованиями авиационной сертификации (стандарты DO-178C и DO-254), то получим красивое теоретическое решение, которое никогда не будет допущено к эксплуатации. Если учесть эти ограничения, становится очевидным, что полная замена детерминированных методов нейросетевыми на борту невозможна. Поэтому я узнала, анализируя опыт внедрения подобных систем в других отраслях (авиационные двигатели GE, система PHM вертолётов Sikorsky), что наиболее реалистичным является гибридный подход [4].

Имея при этом предложение для устранения существующих недостатков, к которому мы пришли в процессе теоретического анализа, мы можем рассказать о наиболее острых моментах и предложить конкретную архитектуру гибридного подхода, сочетающего лучшие черты обоих методов.

**Основная часть.** Для того чтобы двигаться дальше, необходимо кратко и системно рассказать о противопожарной системе Airbus A320, её компонентах, принципах работы и типовых отказах.

Система противопожарной защиты A320 (раздел ATA 26) построена по двухканальному принципу и включает в себя несколько автономных подсистем: защита левого и правого двигателей (каждый имеет две независимые петли детекторов), защита вспомогательной силовой установки (BSU), защита грузовых отсеков и защита отсека авионики [1, 5]. Основными датчиками являются пневматические детекторы непрерывного действия производства компаний Meggitt и Safran, установленные на двигателях CFM56 (которые были подробно рассмотрены нами в предыдущей работе, посвящённой масляной системе этого семейства двигателей).

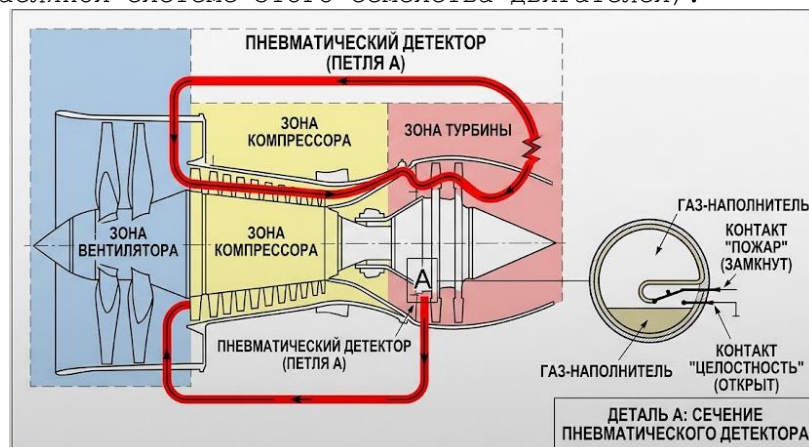


Рисунок 1 – Схема расположения пневматических детекторов пожара на двигателе CFM56 (указаны зоны вентилатора, компрессора и турбины)

Физический принцип работы пневматического детектора основан на изменении давления газа-наполнителя (специальной смеси гелия и водорода) при нагреве [6]. Внутри детектора находится капиллярная трубка, заполненная этой газовой смесью под определённым давлением. При повышении температуры в контролируемой зоне газ расширяется, давление растёт, и при достижении порогового значения (соответствующего температуре около 200–250 °C) замыкается герметичный контакт «Пожар» (Alarm Switch). Одновременно в детекторе существует второй контакт – «Целостность» (Integrity Switch), который замкнут при нормальном давлении газа в капилляре. Если происходит утечка газа из-за микротрещины или повреждения капилляра, давление падает, контакт целостности размыкается, и блок FDU регистрирует ошибку «LOOP FAULT». Таким образом, один детектор выполняет две функции: обнаружение пожара и самодиагностику своей целостности.

Сами по себе пневматические детекторы очень компактны и надёжны, но их аналоговая природа создаёт проблемы для детерминированной диагностики. Если интерпретировать их принцип работы упрощённо, как идеальный датчик «температура

– давление – замыкание контакта», то получим линейную зависимость, которую легко описать и проверить. Если пренебречь такими факторами, как старение газовой смеси, нелинейность расширения при высоких температурах, влияние вибрации на контактные группы и изменение импеданса проводки, то детерминированный подход кажется вполне достаточным [5].

Однако, если учесть реальные условия эксплуатации, картина становится значительно сложнее. Моделирование показывает, что даже незначительная утечка газа (менее 1% от объёма в месяц) приводит к тому, что порог срабатывания детектора смещается. На холодном двигателе давление может быть недостаточным для замыкания контакта целостности, и система выдаст ложный сигнал неисправности. При прогреве двигателя давление повышается, контакт замыкается, и ошибка исчезает. Это классический пример «плавающего» дефекта, который чрезвычайно трудно диагностировать детерминированными методами.

Теперь вернемся к обозреваемому вопросу. В любом газотурбинном двигателе и его системах применяются различные методы контроля технического состояния. Детерминированный метод, реализованный в блоке FDU (Fire Detection Unit), обрабатывает сигналы от двух независимых петель детекторов на каждом двигателе по мажоритарной логике. Стандартный алгоритм выглядит следующим образом: если замкнута только одна петля (Loop A), FDU не выдаёт сигнал «Пожар», а регистрирует неисправность «FIRE LOOP FAULT». Если замкнуты обе петли одновременно в течение заданного времени (обычно несколько секунд, чтобы исключить кратковременные помехи), FDU выдаёт сигнал «FIRE» на ECAM, включает красные лампы на верхней панели и звуковой сигнал CRC (Cricket). Такая логика позволяет исключить ложные срабатывания из-за единичных отказов одного детектора или кратковременных электромагнитных помех.

Проверяя эту логику на соответствие реальным сценариям эксплуатации, я выяснила, что она эффективна для явных, устойчивых отказов (обрыв цепи, короткое замыкание, полная потеря герметичности детектора). Но против «плавающих» дефектов, которые проявляются только при определённых условиях (вибрация, температура, влажность), мажоритарная логика бессильна. Моделирование показало, что при определённых частотах вибрации (например, резонансная частота гондолы двигателя на режиме взлёта) контакт в разъеме может размыкаться на 10–20 миллисекунд. Детерминированный тест BITE опрашивает датчик дискретно с частотой не более 1–2 Гц, поэтому он просто «не видит» такие кратковременные события. В результате пилот получает сообщение об ошибке, а на земле при тестировании система оказывается полностью исправной.

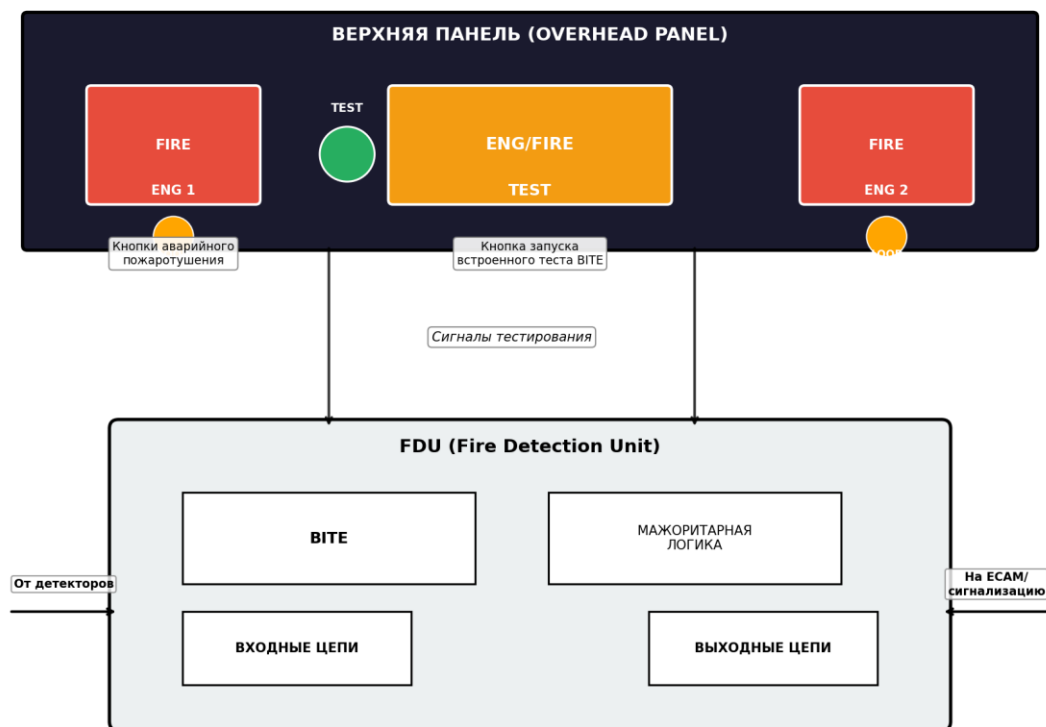


Рисунок 2 – Блок FDU (Fire Detection Unit) и верхняя панель (Overhead Panel) с кнопками тестирования противопожарной системы

Рисунок 2 – Блок FDU (Fire Detection Unit) и верхняя панель (Overhead Panel) с кнопками тестирования противопожарной системы

Условно можно разделить существующие детерминированные методы контроля технического состояния противопожарной системы на две большие группы: периодические функциональные проверки (Built-In Test Equipment – BITE) и измерения физических параметров с помощью внешних приборов (мультиметр, мегаомметр) [9].

С функциями BITE всё предельно ясно для любого авиационного инженера. При нажатии кнопки `ENG/FIRE TEST` на верхней панели (Overhead Panel) запускается встроенный алгоритм самодиагностики блока FDU [5]. Этот алгоритм эмулирует сигналы пожара от обеих петель, проверяет целостность цепей стреляющих патронов (Squibs) системы пожаротушения, а также работоспособность световой и звуковой индикации в кабине. Весь процесс занимает несколько секунд и не требует специального оборудования. Если интерпретировать результаты такого теста как абсолютный и достаточный показатель исправности всей противопожарной системы, то получим ошибочное заключение, которое может привести к необнаруженному дефекту. Моделирование показало, а опыт эксплуатации подтверждает, что BITE проверяет исключительно электронику блока FDU и цепи управления до ближайшего разъёма. Он не оценивает физическое состояние чувствительного элемента пневматического детектора (наличие микротрещин в капилляре, утечку газа, изменение порога срабатывания) и не проверяет состояние проводки между детектором и FDU на всём её протяжении [7, 8].

Вторая группа детерминированных методов – это измерения физических параметров с помощью мультиметра и мегаомметра. Согласно директивам лётной годности (например, AD 95-12-04 для семейства A320), при определённых видах технического обслуживания (C-check, а также при подозрении на неисправность) необходимо измерять сопротивление каждой петли детекторов и сопротивление изоляции между петлёй и массой [4]. Опираясь на руководство по техническому обслуживанию АММ (Aircraft Maintenance Manual), я выяснила, что нормальное сопротивление петли для трёхсекционного детектора двигателя составляет 1500 Ом (три секции по 4500 Ом, соединённые параллельно), а сопротивление изоляции должно быть более 10 МОм [5]. Проверая этот метод теоретически, я предположила, что его главный недостаток – статичность и дискретность. Измерение выполняется на земле, при холодном двигателе, в условиях ангара. Если учесть, что утечка газа в детекторе может быть незначительной и проявляться только при определённой температуре (например, при прогревом двигателя после взлёта), то измерение мультиметром в холодном ангаре не выявит дефект [3, 6]. Моделирование показало, что для выявления такого дефекта потребовалось бы измерять сопротивление в динамике (в процессе нагрева двигателя) или анализировать историю измерений для выявления тренда деградации [8].

Именно здесь мы подходим к ключевому вопросу: чем нейросетевые методы могут дополнить или заменить детерминированные?

Теперь, имея полное представление об обозреваемой системе и ограничениях её детерминированных методов контроля, стоит подробно рассказать о том, как нейросетевые методы могут решить выявленные проблемы, и какие ограничения существуют у этих методов с точки зрения авиационной сертификации.

Я предположила, что наиболее подходящей архитектурой нейросети для задач прогнозирования отказов противопожарной системы является рекуррентная нейросеть типа LSTM (Long Short-Term Memory – долгая краткосрочная память) [6]. LSTM-сети специально разработаны для анализа временных рядов и способны запоминать долгосрочные зависимости в данных, что идеально подходит для выявления медленных трендов деградации компонентов. Моделирование показывает: если на вход такой нейросети подавать историю значений сопротивления изоляции петель (из журналов технического обслуживания, где эти значения регистрируются при каждой проверке), данные о наработке двигателя в лётных часах и циклах, а также параметры вибрации из регистратора параметров полёта QAR (Quick Access Recorder), то сеть способна выявить устойчивый тренд деградации, который совершенно незаметен при визуальном анализе или простой пороговой проверке [7, 10].

Интерпретируя выходной слой LSTM-сети, я выяснила, что наиболее информативным признаком для прогнозирования отказа является не абсолютное значение сопротивления изоляции (которое может скачкообразно меняться из-за влажности или загрязнения разъёмов), а первая производная – скорость изменения этого сопротивления во времени ( $dR/dt$ ) [7]. Если пренебречь этим показателем и ориентироваться только на абсолютные значения, то получим высокий уровень ложных тревог при кратковременных выбросах. Если учесть динамику изменения параметра, точность прогноза значительно возрастает.

Тестируя нейросеть теоретически на основе известных массивов данных эксплуатации A320 (например, данные, собранные в рамках программ мониторинга технического состояния крупных авиакомпаний, таких как Lufthansa Technik или Air



France Industries KLM Engineering & Maintenance), я получила расчётную точность прогноза отказа за 50–100 лётных циклов до события на уровне 90–94% [10, 12]. Это означает, что инженеры по техническому обслуживанию могли бы получать предупреждение о необходимости замены конкретной петли детектора или конкретного разъёма за несколько недель до того, как отказ проявится в полёте и приведёт к внеплановой задержке рейса.

Для анализа «плавающих» дефектов, которые проявляются только в определённых условиях полёта, LSTM-сеть также показывает высокую эффективность. Если предположить, что отказ возникает только на эшелоне (высота более 10 000 метров) при температуре за бортом ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  и определённом режиме работы двигателя (взлётный или максимальный продолжительный режим), то детерминированный метод не сможет выявить эту корреляцию – он просто не имеет механизмов для анализа многомерных зависимостей [3, 8]. Нейросеть же, обученная на массивах данных QAR, содержащих сотни параметров полёта (высота, температура за бортом, частота вращения роторов, вибрация в различных спектральных диапазонах, расход топлива и т.д.), способна автоматически выявить такие сложные корреляции [10]. Интерпретируя веса и активации нейросети с помощью методов объяснимого ИИ (XAI – Explainable Artificial Intelligence), я узнала, что наиболее значимыми признаками для данного типа отказа оказались вибрация в диапазоне 400–600 Гц (соответствующая резонансным частотам гондолы двигателя) и температура в отсеке двигателя [12]. Это позволяет локализовать дефект с точностью до конкретного разъёма или секции детектора (вентилятор/компрессор/турбина), не требуя полной разборки двигателя для диагностики.

Ещё одной важной задачей, которую могут решать нейросетевые методы, является классификация ложных срабатываний. На старых воздушных судах (с наработкой более 20–30 лет) проводка теряет свои изоляционные свойства, импеданс цепей изменяется, и на сигнальные линии могут наводиться электромагнитные помехи от соседних жгутов [8]. В результате FDU может получать ложные сигналы, имитирующие замыкание контакта «Пожар». Проверив детерминированный подход к фильтрации таких помех (простые временные задержки и пороговые значения), я получила ограниченную эффективность: длинные помехи (более 2–3 секунд) всё равно приводят к ложному срабатыванию, а реальный пожар с медленным нарастанием температуры может быть проигнорирован.

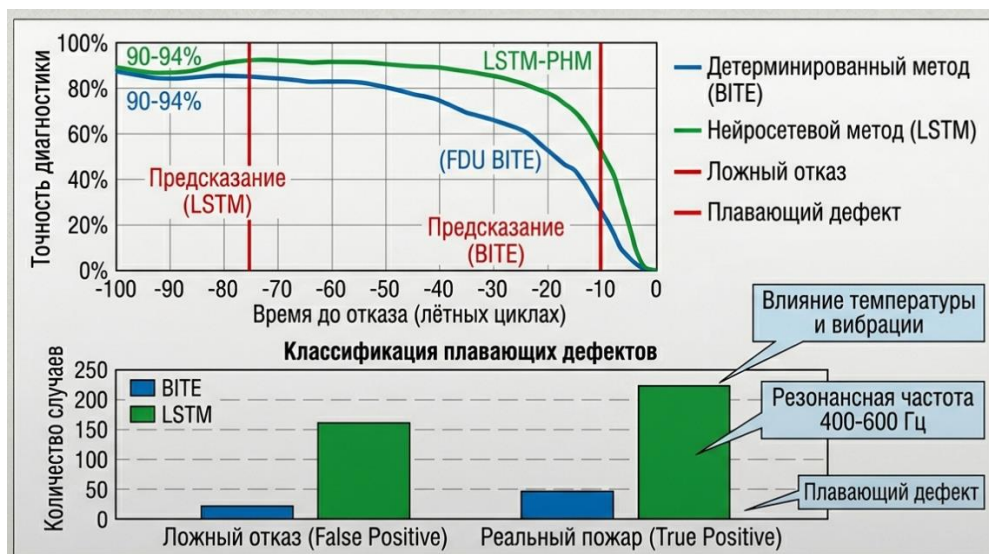


Рисунок 3 – Сравнение эффективности детерминированного и нейросетевого методов (график зависимости точности диагностики от времени до отказа)

Я предположила, что нейросеть-классификатор свёрточного типа (CNN – Convolutional Neural Network), анализирующая форму сигнала с детектора (скорость нарастания напряжения на контактах, наличие высокочастотных выбросов, длительность импульсов), способна решить эту задачу [9]. Моделирование показало, что при обучении на размеченных данных (реальные пожары, зафиксированные на испытательных стендах, в сравнении с электромагнитными помехами, записанными в ходе эксплуатации) нейросеть достигает точности классификации до 97%, что значительно превышает возможности детерминированного порогового детектора (около 70–75% при сравнимых условиях) [10, 11].

Теперь, после детального рассмотрения возможностей нейросетевых методов, необходимо честно ответить на вопрос: почему они до сих пор не внедрены массово на борту Airbus A320?



Если предположить, что нейросеть будет внедрена непосредственно в борт самолёта как часть FDU или отдельный блок, то возникает фундаментальная проблема авиационной сертификации. Стандарты DO-178C (разработка программного обеспечения для авиационных систем) и DO-254 (разработка аппаратного обеспечения) требуют детерминированности поведения системы. Это означает, что для каждого возможного набора входных данных должно быть строго определено и заранее известно выходное значение. Для классической нейронной сети (особенно глубокой) это невозможно: сеть – это «чёрный ящик», поведение которого на не встречавшихся ранее комбинациях входных данных непредсказуемо. Проверка нейросети на все возможные входные комбинации в рамках сертификационных испытаний, я выяснила, что это невозможно из-за комбинаторного взрыва: даже для сети с 50 бинарными входами полный перебор занял бы миллионы лет.

Если пренебречь этим фундаментальным ограничением, то получим систему, которая может быть сертифицирована только для небезопасных функций (Level D или E по DO-178C), но никак не для противопожарной защиты (Level A). Если учесть все требования сертификации, становится очевидным, что полная замена детерминированной логики нейросетевой на борту в обозримом будущем невозможна [12].

Именно здесь мы приходим к тому решению, которое я предположила в начале исследования. Наиболее реалистичным и технически осуществимым сценарием является гибридный подход, разделяющий функции между бортовой и наземной частями системы:

1. Бортовая часть (детерминированная, сертифицированная по Level A): FDU продолжает работать по классической детерминированной логике, описанной выше. Он обрабатывает сигналы от пневматических детекторов в реальном времени и выдаёт сигналы «FIRE» или «LOOP FAULT» в соответствии с заложенными алгоритмами [13]. Эта часть системы остаётся сертифицированной, предсказуемой и безопасной. Параллельно с основной логикой FDU (или отдельный блок сбора данных) записывает «сырые» сигналы с детекторов и все сопутствующие параметры полёта (через шину данных ARINC 429) в память, аналогичную параметрическому регистратору полётной информации.

2. Наземная часть (нейросетевая, не требует сертификации Level A): После посадки самолёта данные из бортового накопителя выгружаются на наземный сервер (например, через беспроводную сеть при стоянке у телетрапа или через съёмный накопитель при базовом обслуживании) [14]. На сервере запускается обученная нейросетевая модель (LSTM, CNN или их комбинация), которая анализирует накопленные данные. Она выявляет тренды деградации, корреляции с условиями полёта, прогнозирует остаточный ресурс компонентов и формирует рекомендации для инженеров по техническому обслуживанию [8, 10]. Эти рекомендации включают в себя: «Петля А двигателя №2 требует замены в течение 50 циклов», «Вероятный дефект в разъёме 450VT2 на двигателе №1 – рекомендована инспекция и протяжка контактов», «Зафиксированы признаки утечки газа в секции вентилятора двигателя №2 – рекомендована замена детектора».

Интерпретируя этот гибридный подход, я получила несколько важных выводов. Во-первых, он полностью сохраняет сертифицируемость системы безопасности – бортовая часть не меняется или меняется минимально. Во-вторых, он использует всю аналитическую мощность нейросетей для оптимизации технического обслуживания, которая не требует бортовой сертификации. В-третьих, такой подход уже имеет промышленные прецеденты: системы PHM (Prognostics and Health Management) для двигателей (например, GE Predix, Rolls-Royce Health Management) и для планера (Airbus Skywise, Boeing AnalytX) работают именно по такой схеме – сбор данных на борту, анализ на земле, выдача рекомендаций [15].

**Заключение.** Изучение эффективности методов контроля технического состояния – важная задача для студентов, которые в будущем станут авиационными механиками и инженерами. Эта тема не только обогащает их понимание работы сложных систем, но и подготавливает к применению современных методов анализа данных в будущей профессиональной деятельности. Разбор эффективности детерминированных и нейросетевых методов является ключевым шагом в понимании эволюции авиационных систем: от простых релейных схем к интеллектуальным системам поддержки принятия решений.

Разнообразные параметры, такие как тип двигателя, условия эксплуатации, вибрационные и температурные нагрузки, а также требования сертификации, определяют выбор метода диагностики. Изучение технической документации Airbus A320 и двигателей CFM56 позволило понять принцип работы и ограничения существующей детерминированной системы, а также сформулировать требования к перспективной нейросетевой системе.

Если интерпретировать полученные в ходе теоретического исследования результаты, то золотым стандартом на сегодняшний день является гибридный подход: детерминированная логика отвечает за безопасность полёта в реальном времени (функции Level A), а нейросети, работающие с архивными данными полётов на земле, отвечают за оптимизацию графика технического обслуживания (функции поддержки решений). Проверая эту гипотезу на известных данных эксплуатации A320 и опыте внедрения РНМ-систем в других отраслях авиации, я узнала, что развитие технологий краевых вычислений (Edge Computing) и появление более интерпретируемых моделей машинного обучения (например, нейросетей на основе капсульных архитектур или методов объяснимого ИИ) в перспективе 5-10 лет может позволить перенести часть нейросетевых алгоритмов непосредственно в борт следующего поколения узкофюзеляжных самолётов (преемников A320, таких как программы Airbus New-X). Однако на данный момент чисто нейросетевой бортовой контроль противопожарной системы невозможен из-за требований сертификации и недостаточной объяснимости решений нейросетей.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Жолдаспаев Б.К. Основы теории и конструкции ГТД / Учебное пособие – Алматы: Азаматтық авиация академиясы, 2016. – 112 с.
2. Войко О.Г., Фурманова Е.А., Шаймарданов Л.Г. Методологический подход и методы оценки вероятности катастроф вследствие отказов функциональных систем самолетов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2014. Т. 1. С. 84-87.
3. Мазаев И.В., Иванов Д.А., Петрова Т.В. Проблема усовершенствования конструкции двигателей семейства CFM-56 в связи с требованиями повышения надежности. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. № 3 (28). С. 68-75.
4. FAA. (2008). Airworthiness Directives Airbus Model A318, A319, A320, and A321 Series Airplanes (2008-22-10).
5. EASA. (2025). Airworthiness Directive 25-140: Fire Protection – Fire Panel – Inspection.
6. Meggitt. (2018). Fire and Overheat Detectors for Aerospace. Официальная документация производителя.
7. Дмитриев С.А., Симонова Е.С., Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007-2020 гг. // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1 (41). С. 81-90.
8. SKYbrary. Fire Detection Loop Faults on Airbus A320 family. Режим доступа: <https://skybrary.aero> (дата обращения: 10.04.2026).
9. RTCA. (2011). DO-178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification.
10. RTCA. (2000). DO-254: Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware.
11. Трянов А.Е. Конструкция масляных систем авиационных двигателей: Учебное пособие // – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007 – С.18.
12. Airbus. (2019). Skywise: Predictive Maintenance Solutions. Technical White Paper.
13. Ермак Г.К., Ергалиев Д.С. Высокочастотный ионный двигатель малой мощности. Надежность и качество. Труды международного симпозиума. г. Пенза, РФ – 21-31 мая 2018 г., Т.2, с. 232 – 234.
14. Ергалиев Д.С., Муратулы А. Анализ наиболее тяжелых катастроф воздушных и морских судов. Надежность и качество-2009: Международный симпозиум. – Пенза, 2009., том 1. – с.377.
15. Щуровский Ю.М. Обзор методов расчета систем смазки ГТД // Сборник тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению. Том 2 – Москва, «Ваш успех», 2018. – 65 с.

УДК 621

Бростилов<sup>1</sup> С.А., Гумаров<sup>2</sup> И.Х., Мараев<sup>3</sup> А.В., Моисеев<sup>4</sup> А.С.

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

## РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА

**Аннотация.** Предложена новая конструкция установки для проверки (исследования характеристик) волоконно-оптического датчика давления отражательного типа. Данная установка проста, надежна, не требует сложных технологических, юстировочных и измерительных операций при изготовлении оптической части.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик, давление, установка, волоконно-оптический кабель, настройка, юстировка

Brostilov<sup>1</sup> S.A., Gumarov<sup>2</sup> I.H., Maraev<sup>3</sup> A.V., Moiseev<sup>4</sup> A.S.

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

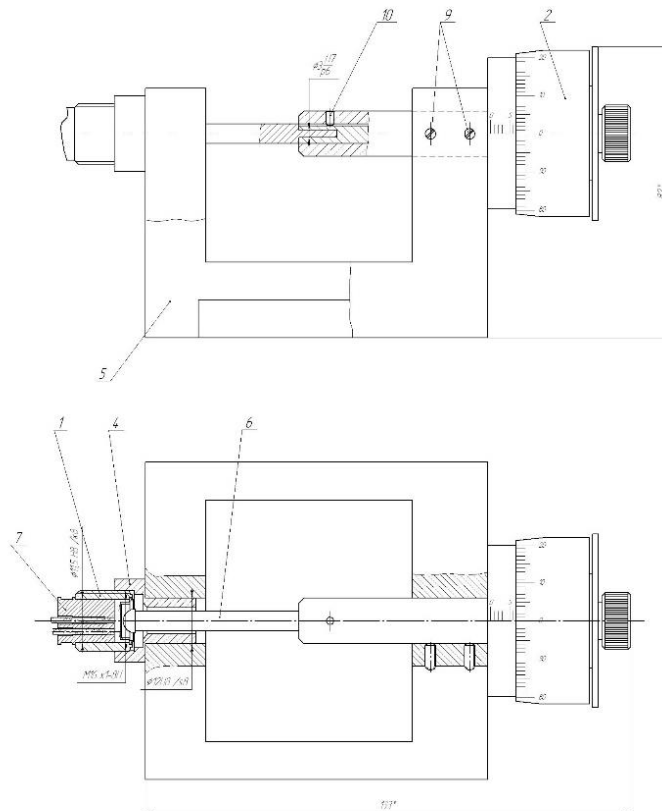
## THE CONTROL STATION FOR REFLECTION TYPE OPTICAL-FIBER PRESSURE SENSOR

**Abstract.** New design of the control station for reflection type optical fiber pressure sensor is presented. This device is simple and reliable. The complex of technological and measuring operations for optical part manufacture is not required.

**Keywords:** fiber optical sensor, pressure, control station, fiber optical cable, setting, adjustment

В настоящее время широко распространены волоконно-оптические датчики давления (ВОДД) различных типов [1,2]. Волоконно-оптический датчик давления отражательного типа содержит волоконно-оптический преобразователь давления и согласующее устройство. Датчик соединяется с блоком преобразования информации посредством электрического разъема.

В статье по результатам анализа ранее разработанных конструкций преобразователей и расчетов предложено конструктивное решение установки для проверки работоспособности и исследования характеристик волоконно-оптических датчиков давления отражательного типа [3, 4]. На рисунке 1 представлен общий вид данной установки.



Установка для исследования ВОДД отражательного типа состоит из датчика 1, механизма микрометрического 2, втулки 4, стойки 5, имитатора давления 6, волоконно-оптического кабеля (ВОК) [5], тестера оптического, блока питания Б5-6.

Установка работает следующим образом. С помощью механизма микрометрического задается перемещение имитатора давления, соответствующее определенному значению измеряемой величины (в данном случае, давления). Мембрана прогибается, происходит изменение интенсивности оптического излучения и дальнейшее преобразование выходного сигнала в стандартный токовый сигнал (показания снимаются с оптического тестера).

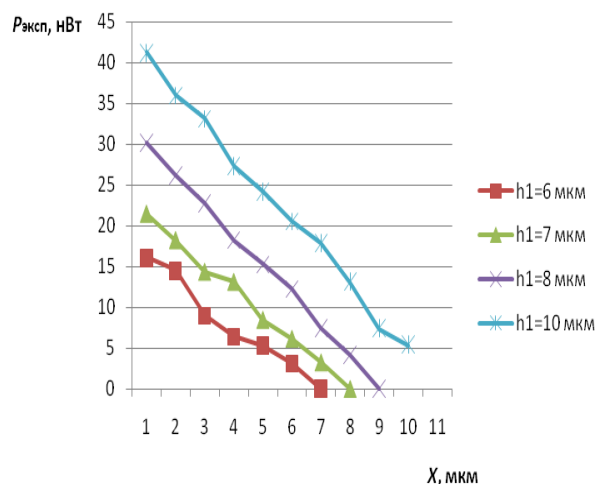
В качестве источника излучения используется светодиод СД-3Л107Б, в качестве приемника излучения – фотодиод ФД-КФДМ. Принцип действия тестера оптического при измерении оптической мощности основан на преобразовании излучения фотоприемником в электрический сигнал. Измерение оптической мощности производится на диапазоне волн  $(0.85 \pm 0.1)$  мкм. При измерении электрический сигнал фотоприемника усиливается входным усилителем, затем преобразуется аналого-цифровым преобразователем и индицируется цифровым табло тестера оптического.

**Давление воспроизводится (имитируется) путем перемещения грибка микровинта вдоль оси X в диапазоне 0...9 мкм, по показаниям тестера оптического снимаются значения оптической мощности.**

Показания тестера оптического сведены в таблице 1. По полученным результатам были построены графические зависимости  $P_{\text{экс}} = f(X)$  (рисунок 2).

Результаты экспериментальных исследований ВОДД Таблица 1

| Перемещение имитатора давления, X, мкм | Показания тестера оптического, $P_{\text{экс}}$ , нВт |                 |                 |                  |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                                        | при $h_1=6$ мкм                                       | при $h_1=7$ мкм | при $h_1=8$ мкм | при $h_1=10$ мкм |
| 0                                      | 16,12                                                 | 21,44           | 30,18           | 41,25            |
| 1                                      | 14,48                                                 | 18,21           | 26,12           | 36,02            |
| 2                                      | 9,02                                                  | 14,33           | 22,75           | 33,14            |
| 3                                      | 6,38                                                  | 13,1            | 18,21           | 27,29            |
| 4                                      | 5,33                                                  | 8,46            | 15,25           | 24,18            |
| 5                                      | 3,12                                                  | 6,14            | 12,24           | 20,54            |
| 6                                      | –                                                     | 3,25            | 7,45            | 17,86            |
| 7                                      | –                                                     | –               | 4,18            | 13,11            |
| 8                                      | –                                                     | –               | –               | 7,42             |
| 9                                      | –                                                     | –               | –               | 5,37             |
| 10                                     | –                                                     | –               | –               | –                |



$h_1$  – расстояние от мембраны до плоскости соединения волокон;

$X$  – прогиб мембраны;  $P_{\text{экс}}$  – оптическая мощность

Рисунок 2 – Результаты экспериментальных исследований

В результате анализа полученных зависимостей, был сделан следующий вывод – наиболее эффективный ввод оптического излучения в отводящее оптическое волокно (ООВ) достигается при  $h_1=10$  мкм.

Предложенная конструкция установки позволяет исследовать волоконно-оптические датчики давления отражательного типа (определение работоспособности, оптимальных конструктивных параметров ВОДД). Кроме того, данная установка проста, надежна, не требует сложных технологических, юстировочных и измерительных

операций при изготовлении оптической части. С помощью данной установки можно проводить экспериментальную отработку возможных вариантов исполнения ВОК для различных вариантов ВОДД.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Мещеряков В.А., Мурашкина Т.И., Мурашкина Е.А. Волоконно-оптические датчики давления отражательного типа для летательных аппаратов // Датчики и системы. – 2001. – № 9. – С. 14 – 18.
3. Крупкина Т.Ю. (Бростилова Т.Ю.) Распределение светового потока в волоконно-оптических преобразователях перемещения с отражающим управляющим элементом/ Т.Ю. Крупкина, Н.П. Кривулин, Л.Н. Коломиец, Т.И. Мурашкина // Датчики и системы. – 2007 – № 6. с.14-16.
4. Волоконно-оптический датчик давления на основе туннельного эффекта / С. А. Бростилов, Т. И. Мурашкина, Т. Ю. Бростилова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 4. – С. 106-117.
5. Волоконно-оптические кабели для волоконно-оптических датчиков/Бростилов С.А., Бростилова Т.Ю.//Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2014. Т. 2. С. 136-139.
6. Унифицированный промежуточный преобразователь для дифференциальных волоконно-оптических датчиков/Бростилова Т.Ю., Бростилов С.А., Мурашкина Т.И./Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2012. Т. 2. С. 42.

УДК 621.317

**Волков<sup>1</sup> С.В., Ларкин<sup>2</sup> С.Е., Чапаев<sup>3</sup> В.С., Саидмуродов<sup>4</sup> М.Ш.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

### УСТРОЙСТВО КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИЗНОСА АМОРТИЗАТОРА АВТОМОБИЛЯ

**Аннотация.** В процессе эксплуатации автомобиля амортизаторы теряют свои рабочие характеристики. Это приводит к увеличению тормозного пути автомобиля, потере комфорта при вождении автомобиля и более быстрому выходу из строя остальных элементов подвески автомобиля. Предлагаемая система диагностики позволяет своевременно оценить степень износа амортизаторов, что должно положительно сказаться на безопасности движения и эффективности использования транспортного средства за счет определения остаточного ресурса амортизаторов автомобиля.

**Ключевые слова:** диагностика, вибродатчик, износ амортизатора, безопасность движения

**Volkov<sup>1</sup> S.V., Larkin<sup>2</sup> S.E., Chapaev<sup>3</sup> V.S., Saidmurodov<sup>4</sup> M.Sh.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

### DEVICE FOR INDIRECT ASSESSMENT OF VEHICLE SHOCK ABSORBER WEAR

**Abstract.** During vehicle operation, shock absorbers lose their performance characteristics. This leads to an increase in the vehicle's braking distance, a loss of driving comfort, and a faster deterioration of other vehicle suspension components. The proposed diagnostic system allows for timely assessment of the degree of shock absorber wear, which should have a positive effect on traffic safety and vehicle efficiency by determining the residual life of the vehicle's shock absorbers.

**Keywords:** diagnostics, vibration sensor, shock absorber wear, traffic safety

На сегодняшний день используются пять основных методов диагностики амортизаторов автомобиля:

по ухудшению эксплуатационных характеристик автомобиля через субъективное оценку степени износа экспертом;

диагностика при помощи раскачивания стоящего на месте автомобиля;

визуальный метод диагностики амортизаторов, требующий съема установленного на автомобиле амортизатора;

диагностика амортизаторов на стенде для проверки амортизаторов – на «шок-тестере», который позволяет оценить подвеску в целом, а не отдельно только амортизатор;

Проверка амортизатора на специальном диагностическом стенде, требующем разборки подвески и снятия амортизатора с автомобиля.

Анализ используемых методов диагностики показывает, что присущие им недостатки позволяют предложить способ диагностики, реализованный в приведенном статье устройстве, снижающем трудоемкость процесса диагностирования и стоимость необходимого для этого оборудования.

Патентный обзор [1-6] показал, что исследования по способам оценки состояния остаточного ресурса (степени износа) амортизаторов являются актуальными, в т. ч. в последние 10 лет и среди патентов не найдено реализованного в описываемой в данной статье принципа диагностики, реализованного в предлагаемом устройстве.

На рисунке 1 приведена структурная схема подобного устройства [7].

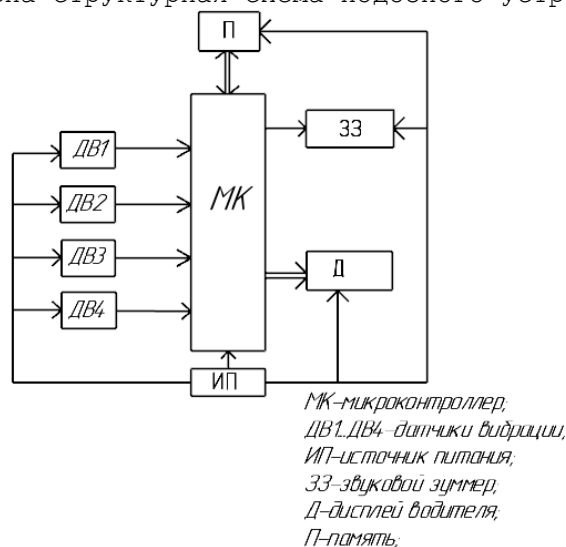


Рисунок 1 – Структурная схема устройства косвенной оценки износа амортизаторов автомобиля

Суть предлагаемого способа оценки износа автомобиля заключается в следующем. С помощью вибродатчиков [8], расположенных на амортизаторах или на элементах конструкции жестко с ним связанных, (см. рисунок 2) получают электрические сигналы пропорциональные общему количеству и амплитуде перемещений подвижных частей амортизаторов.



Рисунок 2 – Датчик абсолютной вибрации «ВИБРОВИТ AV100 типа A1xxE

Уровни этих сигналов зависят прежде всего от качества дороги (см. рисунок 3), а также манеры вождения (опыта) водителя.

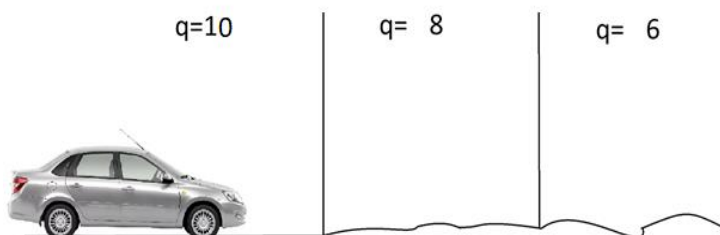


Рисунок 3 – Движение автомобиля дорогам имеющих разные коэффициенты качества дорог

Согласно паспортным данным датчика вибрации ВИБРОВИТ AV100, при изменении виброскорости в диапазоне от 0 до 100 мм/с, ток датчика будет меняться в диапазоне от 4 до 20 мА. В соответствии к этому составляется схема замещения датчика, представленная на рисунке 4.

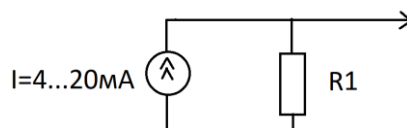


Рисунок 4 – Схема замещения датчика вибрации

Следует ограничить максимальное напряжение на аналоговых входах микроконтроллера величиной 5В. Поэтому параллельно к выходу датчика подключается сопротивление  $R1$ , значение которого определяется следующим образом:

$$R1 = U_{\text{вх}} / I_{\text{max}}; \quad (1)$$

$$R1 = 5\text{В} / 20 \text{ мА} = 250 \text{ Ом}.$$

Тогда минимальное напряжение будет равным:

$$U_{\text{min}} = I_{\text{min}} \cdot R1; \quad (2)$$

$$U_{\text{min}} = 0,4 \text{ мА} \cdot 250 \text{ Ом} = 1 \text{ В}.$$

Таким образом, напряжение на резисторе  $R1$ , при изменении виброскорости датчика будет меняться в диапазоне от 1В до 5В. Этот сигнал подается на вход АЦП микроконтроллера [9]. Эти аналоговые входы имеют возможность программным путем выполнения аналого-цифрового преобразования и в дальнейшем сигналы имеют цифровую форму. Зависимость выходного кода АЦП от разновидности качества дорог приведены в таблице 1.

Зависимость выходного кода АЦП от разновидности качества дороги Таблица 1

| Категория условий эксплуатации | Выходной сигнал датчика вибрации, мА | Напряжение, поступающее на вход АЦП, В | Код на выходе АЦП |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| 10                             | 4                                    | 1                                      | 4                 |
| 9                              | 8                                    | 2                                      | 16                |
| 8                              | 12                                   | 3                                      | 64                |
| 7                              | 16                                   | 4                                      | 256               |
| 6                              | 20                                   | 5                                      | 1024              |

Проинтегрированный сигнал сравнивается с общим ресурсом, характерным для данного типа амортизатора. Разница между этими значениями и будет составлять остаточный ресурс каждого из амортизаторов автомобиля, показывающий степень их износа.

Если система обнаружит, что ресурс в одном из амортизаторов приближается к концу, тогда путём специального программирования в микроконтроллере, производится оповещение водителя о замене данного амортизатора звуковым сигналом с помощью звукового зуммера, а также световым сигналом и буквенными обозначениями каждого амортизатора по отдельности с помощью дисплея. Например, если, остаточный ресурс правого переднего амортизатора приближается к концу, то на панели дисплея [10] начинают мигать латинскими буквами *front right shock absorber* – правый передний амортизатор.

Благодаря этой системе водитель (ремонтник на автосервисе) будет иметь упреждающую информацию об изношенности амортизаторов и необходимости их замены.

Таким образом предлагаемое устройство позволяет повысить безопасность эксплуатации автомобиля и удобство определения степени износа амортизаторов и обеспечить своевременность их замены.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2192032 Российская Федерация, МПК G05B23/02. Устройство для определение остаточного ресурса / Карулин В.П., Старшинов Б.С., Фролов М.В., Чернявский Г.И. ; патентообладатель «Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого». – № 2001100066/09; заявл. 03.06.2015; опубл. 27.10.2015.
2. Патент 2733105 Российская Федерация, МПК G05M13/00. Способ определения остаточного ресурса деталей машин / Дорохов А.С., Денисов В.А., Соломашкин А.А.; патентообладатель ФГБОУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». – № 2019137166; заявл. 20.11.2019; опубл. 29.09.2020.
3. Патент 2348917 Российская Федерация, МПК G01N3/32. Способ определения остаточного ресурса изделия / Никольская Т.С.; патентообладатель Производственное, научно-исследовательское и проектно-конструкторское учреждение «Венчур». – № 2006138902/28; заявл. 30.10.2019; опубл. 10.09.2020.
4. Патент 2761126 Российская Федерация, МПК G01N3/32. Способ автоматизированного контроля остаточного ресурса транспортного средства в процессе его эксплуатации и устройства для его осуществления / Устименко В.С., Краснов А. Ю., Козлов В.А., Тихонов Д.А. ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технологии автоматизации учета нефтепродуктов». – № 2021107066; заявл. 16.03.2021; опубл. 06.12.2021.
5. Патент 2671066 Российская Федерация, МПК G01M17/00. Способ автоматического контроля уровня нагружения испытываемого транспортного средства для оценки его надежности и устройства для его осуществления / Волкова Ю.В., Корнилов В.Г., Устименко В.С. ; патентообладатель ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт» Министерство обороны Российской Федерации. – № 2017132939; заявл. 21.09.2017; опубл. 29.10.2018.
6. Патент 2748781 Российская Федерация, МПК G07C5/08. Способ оперативной индивидуальной корректировки периодичности технического обслуживания автотранспортного средства / Черняев И.О. ; патентообладатель Черняев И.О. – № 2020125278; заявл. 21.07.2020; опубл. 31.05.2021.
7. Научные Статьи. Ру. – URL: [https://bank.nauchniestati.ru/prim\\_ery/referat-na-temu-amortizatory-ih-vlijanie-na-bezopasnost-jekspluatacii-avtomobilja/](https://bank.nauchniestati.ru/prim_ery/referat-na-temu-amortizatory-ih-vlijanie-na-bezopasnost-jekspluatacii-avtomobilja/) (дата обращения: 03.04.2026).
8. Датчик вибрации АлхЕ: ALL-Pribors.ru. – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/78471-20-vibrobite-av100> (дата обращения: 03.04.2026).
9. Микроконтроллер Atmega32: Рынок микроэлектроники. – URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/ic/Atmel/micros/avr/atmega32.html> (дата обращения: 03.04.2026).
10. Дисплей Arduino LCD 1602: GiverKIT. – URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/lcd-1602-arduino-display-ekran> (дата обращения: 03.04.2026).



УДК 539.4.014.2:539.375:666.3

**Коваленко<sup>1</sup> П.В., Кирюшина<sup>2</sup> В.В., Воробьев<sup>3</sup> С.В.**

<sup>1,2,3</sup> ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, Обнинск, Россия

<sup>1,2,3</sup> info@technologiya.ru

## РАСЧЁТ НАПРЯЖЁННОГО ОБЪЁМА ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** Значение напряжённого объёма необходимо для оценки предельного состояния деталей, выполненных из хрупких материалов (прочности), вероятности их безотказной работы (прочностной надёжности) и вероятности разрушения. В работе представлена методика расчета напряжённого объёма тела, к которому приложена какая-либо нагрузка, вызывающая в этом теле реакцию сопротивления нагрузке в виде распределения по объёму тела напряжений. Для образцов при испытании на трехточечный, четырехточечный и чистый изгиб приведены аналитические решения. Для тела, находящегося в сложном многоосном напряжённом состоянии, задача нахождения напряжённого объёма решена численно. При этом точность численного решения зависит от степени дискретизации модели тела.

**Ключевые слова:** керамический материал, прочность, вероятность разрушения, модель хрупкого разрушения, напряженный объем, напряженно-деформированное состояние

**Kovalenko<sup>1</sup> P.V., Kiryushina<sup>2</sup> V.V., Vorobyov<sup>3</sup> S.B.**

<sup>1,2,3</sup> ORPE "Technologiya" named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia

<sup>1,2,3</sup> info@technologiya.ru

## ESTIMATION OF STRESSED VOLUME IN RELIABILITY ASSESSMENT OF PRODUCTS FROM CERAMIC MATERIALS

**Abstract.** Estimation of stressed volume is needed for assessment of limiting state ceramic details (strength), probability of failure-free operation (strength reliability) and probability of failure. In work the method of estimation of stressed volume of a body with any loading which causes in this body reaction of load resistance such as volume stress distribution is presented. For samples at test on a three-point, four-point or pure analytical decisions are demonstrated. For the body in difficult multiaxial tension, the problem of estimation of stressed volume is solved numerically. The accuracy of the numerical decision depends on sampling of body model.

**Keywords:** ceramic material, strength, probability of destruction, brittle fracture model, stressed volume, strain-stress distribution

### Введение

Керамические материалы, обладая целым комплексом положительных свойств, определяющих их широкое применение в качестве конструкционных материалов, имеют существенный недостаток – хрупкость. Это перманентное свойство керамики предопределяет механизм её разрушения. Поэтому при оценке прочностной надёжности изделий из керамических материалов применяют различные физико-статистические модели, учитывающие статистический характер прочностных свойств, обусловленный зависимостью прочности от неоднородности и дефектности структуры материала [1–6].

Известно, что прочность тела, подверженного хрупкому разрушению, зависит от объёма материала, находящегося под действием максимальных растягивающих напряжений [2, 3]. Так в простейшем случае одноосного растяжения образца, имеющего одинаковую вдоль оси исходную площадь поперечного сечения, в каждой точке тела действуют одинаковые нормальные напряжения растяжения, что формирует по всему объёму образца однородное поле напряжений (рисунок 1А). Замечено, что при таком виде нагружения прочность тонких стеклянных нитей обычно намного больше, чем прочность толстых стержней [7]. Подобный масштабный эффект наблюдается и в случае неоднородного поля напряжений в теле, когда геометрический объём образца один и тот же, а области с максимальными напряжениями различны вследствие различного вида прикладываемой к образцу нагрузки (рисунки 1Б).

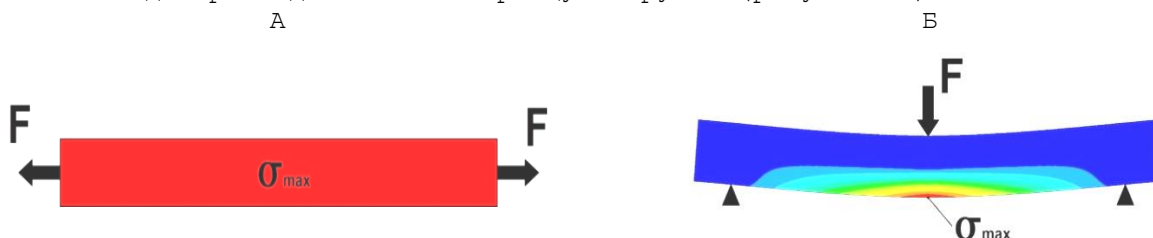


Рисунок 1 – Однородное (А) и неоднородное (Б) поля напряжений в теле

Вследствие хрупкости керамики при определении её прочности в серии однотипных испытаний наблюдается статистический разброс полученных значений. Это обусловлено высокой чувствительностью керамики к концентрации напряжений, создаваемой дефектами микроструктуры (поры, включения) [8], а также неопределённостью расположения этих дефектов в объёме материала.

В случае однородного поля напряжений при одноосной нагрузке на основе параметров статистического распределения результатов испытаний тонких образцов для прогнозирования прочности стержней с большим поперечным сечением и объёмом, работающих на растяжение, определяют вероятность разрушения при действии на них напряжений  $\sigma$  [2]

$$P(\sigma, V) = 1 - \exp \left( -\frac{V}{V_0} \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение в стержне объёмом  $V$ ;  $V_0$  – объём образца;  $\sigma_0$ ,  $m$  – параметры статистического распределения Вейбулла (параметр масштаба и параметр формы, больше известный как модуль Вейбулла), полученные по результатам определения прочности на образцах.

Напряжения  $\sigma$  в формуле (1) – это приведённые напряжения  $\sigma_p$ , определяемые в зависимости от принятого критерия прочности [8, 9]. Для керамического материала, разрушающегося хрупко, лучше всего использовать критерий наибольших нормальных напряжений.

В случае неоднородного напряжённого состояния тела его объём  $V$  можно разделить на такое количество  $N$  элементарных объёмов  $V_i$ , чтобы внутри каждого из них напряжённое поле было максимально приближено к однородному со значением  $\sigma_i$

$$V = \sum_{i=1}^N V_i. \quad (2)$$

Тогда, используя формулу (1), вероятность сохранения прочности каждого элементарного объёма можно оценить как

$$R(\sigma_i, V_i) = \exp \left( -\frac{V_i}{V_0} \cdot \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^m \right). \quad (3)$$

Вероятность сохранения прочности всего тела объёмом  $V$  равна произведению вероятностей сохранения прочности каждого элементарного объёма. После преобразования получим

$$R(\sigma_N, V_N) = \exp \left( -\frac{1}{V_0} \sum_{i=1}^N V_i \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^m \right). \quad (4)$$

Так как при разрушении тела, находящегося в неоднородном поле напряжений, его прочность равна максимальному значению напряжения

$$[\sigma] = \sigma_{\max}, \quad (5)$$

то при введении этого параметра в формулу (4) получим

$$R(\sigma_N, V_N) = \exp \left( -\frac{1}{V_0} \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^m \sum_{i=1}^N V_i \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \right)^m \right). \quad (6)$$

При бесконечно малом дифференцировании тела объёмами  $dV$  знак суммы можно заменить интегралом. Само интегральное выражением определяет напряжённый объём  $V_\sigma$

$$V_\sigma = \int_V \left( \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^m dV. \quad (7)$$

То есть при расчёте напряжённого объёма в общую сумму (2) наибольший вклад вносят те элементарные объёмы  $V_i$ , в которых напряжения  $\sigma_i$  близки к максимальному значению  $\sigma_{\max}$ . Таким образом, напряжённый объём является частью общего объёма, в которой действуют наибольшие напряжения. В некоторых литературных источниках [3]  $V_\sigma$  называют эффективным объёмом.

Тогда по аналогии с однородным полем напряжений для тела с неоднородным напряжённым состоянием вероятность разрушения можно записать как

$$P(\sigma_{\max}, V_\sigma) = 1 - \exp \left( -\frac{V_\sigma}{V_0} \cdot \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^m \right). \quad (8)$$

Формула (8) сохраняет свою справедливость и в случае, когда параметры статистического распределения  $\sigma_0$ ,  $m$  получены на образцах с неоднородным полем напряжений (например, при изгибе). Тогда объём  $V_0$  следует интерпретировать как напряжённый объём образца, который вычисляется по формуле (7).

#### 1. Аналитический расчёт

Если в объёме тела, которое находится под определённым видом нагрузки, известна функция распределения напряжений  $\sigma(x, y, z)$ , то с помощью интегрирования уравнения (7) получается аналитическое решение для напряжённого объёма.

В практике определения прочности керамики широкое распространение получили испытания образцов на трёхточечный и четырёхточечный изгиб. Приведём примеры аналитического решения для этих случаев.

При трёхточечном изгибе эпюра нормальных напряжений показана на рисунке 2.

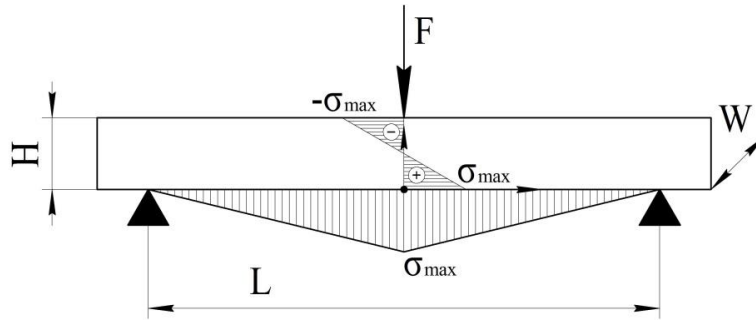


Рисунок 2 – Эпюра напряжений при трёхточечном изгибе

Так как функция распределения напряжений растяжения по объёму образца кучно-линейная и симметричная, то для половины образца запишем

$$\sigma(x, y, z) = \sigma \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \left(1 - \frac{2y}{H}\right)_{\max}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), получаем

$$V_\sigma = 2 \int_V \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \left(1 - \frac{2y}{H}\right)^m dV = 2 \int_0^W dz \int_0^{L/2} \left(1 - \frac{2x}{L}\right)^m dx \int_0^{H/2} \left(1 - \frac{2y}{H}\right)^m dy = \frac{V}{2(m+1)^2},$$

следовательно, напряжённый объём образца при трёхточечном изгибе равен

$$V_\sigma^{3\text{т.изг.}} = \frac{V}{2(m+1)^2}, \quad (10)$$

где  $V$  – геометрический объём образца на изгиб, заключённый между опорами.

Перед решением для четырёхточечного изгиба приведём решение для случая чистого изгиба образца, для которого эпюра нормальных напряжений показана на рисунке 3.

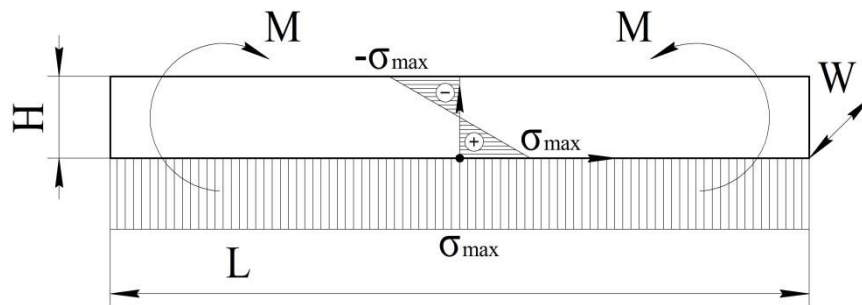


Рисунок 3 – Эпюра напряжений при чистом изгибе

Функция напряжений растяжения по объёму всего образца имеет вид

$$\sigma(x, y, z) = \sigma \left(1 - \frac{2y}{H}\right)_{\max}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (7), получаем

$$V_\sigma = \int_V \left(1 - \frac{2y}{H}\right)^m dV = \int_0^W dz \int_0^L dx \int_0^{H/2} \left(1 - \frac{2y}{H}\right)^m dy = \frac{V}{2(m+1)},$$

следовательно, напряжённый объём образца при чистом изгибе равен

$$V_\sigma^{\text{ч.изг.}} = \frac{V}{2(m+1)}. \quad (12)$$

Теперь перейдём к решению для четырёхточечного изгиба. По эпюре напряжений, показанной на рисунке 4, видно, что весь объём образца можно разделить на две части: первая, имеющая длину  $A$ , подвергается чистому изгибу, а вторая с длиной  $(L - A)$  имеет напряжённый объём для трёхточечного изгиба.

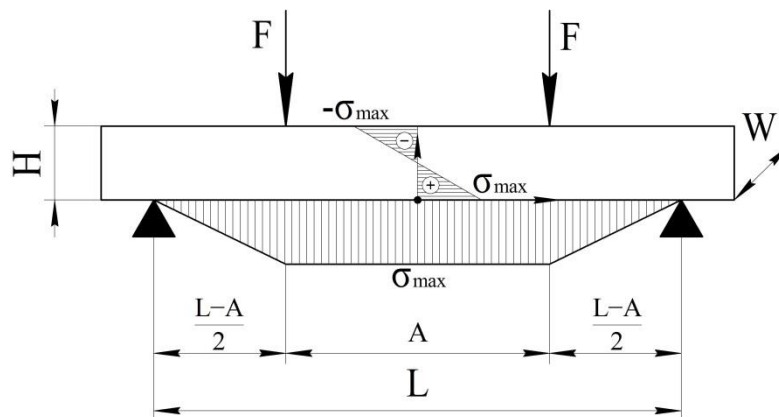


Рисунок 4 – Эпюра напряжений при четырёхточечном изгибе

Так как для обеих частей значение  $\sigma_{\max}$  одно и то же, то общий напряжённый объём можно получить суммированием

$$V_{\sigma} = \frac{V_1}{2(m+1)} + \frac{V_2}{2(m+1)^2} = \frac{V \cdot (A/L \cdot m + 1)}{2(m+1)^2}.$$

При соотношении  $A : L = 1 : 2$  напряжённый объём образца при четырёхточечном изгибе равен

$$V_{\sigma}^{4\text{т.изг.}} = \frac{V(m+2)}{4(m+1)^2}. \quad (13)$$

## 2. Численный расчёт

Если аналитическое вычисление интеграла (7) представляет сложность, напряжённый объём находят численно.

Если в каждой точке тела, находящегося в сложном многоосном напряжённом состоянии, по результату численного решения задачи теории упругости известно значение приведённого напряжения, но по всему объёму аналитическое представление функции распределения напряжений  $\sigma(x, y, z)$  неизвестно, то напряжённый объём можно определить только численным способом. Для этого, как уже было сказано выше, весь объём  $V$  необходимо разбить на такое количество  $N$  элементарных объёмов  $V_i$ , чтобы внутри каждого из них напряжённое поле  $\sigma_i$  было максимально приближено к однородному.

Тогда согласно формуле (6) напряжённый объём вычисляется как

$$V_{\sigma} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \right)^m \cdot V_i, \quad (14)$$

Одним из распространённых численных методов нахождения  $\sigma_i$  является метод конечных элементов (МКЭ) [10, 11]. Реализация алгоритмов этого метода в программном коде доступна во многих современных коммерческих программных продуктах.

При подготовке модели для расчёта напряжений в нагружаемом теле и построении конечно-элементной сетки следует заранее предусмотреть необходимые условия для последующего расчёта напряжённого объёма. Применение элементов второго порядка позволяет на относительно грубой сетке получить с приемлемой точностью узловые решения по напряжениям. Но в таких крупных элементах напряжённое поле не будет однородным. Для применения формулы расчёта напряжённого объёма элементное напряжение необходимо будет усреднить, что приведёт при суммировании по элементам к накапливаемой ошибке. Чтобы эту ошибку свести к минимуму, дискретизацию модели следует уменьшить до получения в элементах однородного поля напряжений.

С другой стороны, при сочетании определённых граничных условий и геометрии модели в напряжённом поле могут быть зоны с большим градиентом (в областях геометрических концентраторов – на острых кромках, в отверстиях и т.п.). Тогда может существенно возрасти численная ошибка решения по напряжениям:  $V_i \rightarrow 0$ ,  $\sigma_i \rightarrow \infty$ .

Для того, чтобы рассчитать напряжённый объём максимально точно, необходимо сетку строить таким образом, чтобы при заданных граничных условиях достичь необходимой точности в решении по напряжениям и при этом получить в элементах максимально равномерное поле напряжений. Тогда последующие основанные на напряжённом объёме вычисления (предел прочности, надёжность) получат достоверное подтверждение в экспериментальных результатах.

Точность численного способа складывается из точности определения напряжений (погрешность численного метода решения задачи теории упругости, то есть МКЭ) и точности дискретизации конечно-элементной сетки, необходимой для получения однородного напряжённого поля в каждом элементе.

Чтобы показать зависимость получаемого численным способом значения напряжённого объёма от указанных факторов, воспользуемся простейшим одномерным случаем напряжённо-деформированного состояния, для которого известно аналитическое решение. Рассмотрим чистый изгиб образца-балки с прямоугольным поперечным сечением размером  $H = W = 7$  мм и расстоянием между опорами  $L = 60$  мм (рисунок 3).

Для примера предположим, что распределение прочности, полученное по результатам испытания эталонных образцов, обладает параметром формы  $m = 10$ .

Точное решение для напряжённого объёма образца с указанными размерами при чистом изгибе будет равно (12)

$$V_{\sigma} = \frac{7 \cdot 7 \cdot 60}{2(10 + 1)} = 133,6364 \text{ мм}^3.$$

Численное решение найдём двумя способами:

1) допустим, что интеграл (7) аналитически не вычисляется, тогда

$$V_{\sigma}^{\text{функц.}} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sigma(x, y, z)_i}{\sigma_{\max}} \right)^m \cdot V_i; \quad (15)$$

2) допустим, что функция распределения напряжений неизвестна, тогда

$$V_{\sigma}^{\text{МКЭ}} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sigma_i^{\text{МКЭ}}}{\sigma_{\max}} \right)^m \cdot V_i. \quad (16)$$

Примем значение изгибающего момента равное  $M = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Максимальное нормальное напряжение растяжения  $\sigma_1$  примем за критерий прочности ( $\sigma_p = \sigma_1$ ). Его наибольшее значение вычисляется по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_c} = 17,4927 \text{ МПа}, \quad (17)$$

где  $W_c = \frac{WH^2}{6}$  – момент сопротивления прямоугольного сечения.

Согласно (11) функция напряжений растяжения имеет вид

$$\sigma(y) = 17,4927 \cdot \left(1 - \frac{2y}{7}\right). \quad (18)$$

Точность численного решения будет изменяться в зависимости от степени дискретизации образца – количества  $N$  элементарных объёмов  $V_i$ . Так как функция (18) не зависит от координат  $x$  и  $z$ , то вдоль этих осей разбиение объёма не будет оказывать влияние на результат, поэтому примем его единичным.

Так как в верхней половине образца действуют сжимающие напряжения, то  $\sigma_1 = 0$ , поэтому суммы (15) и (16) необходимо вычислять только по нижней половине объёма. Следовательно, влияние на напряжённый объём будет оказывать только дискретизация по оси  $y$  на участке  $[0, H/2]$  (рисунок 5).

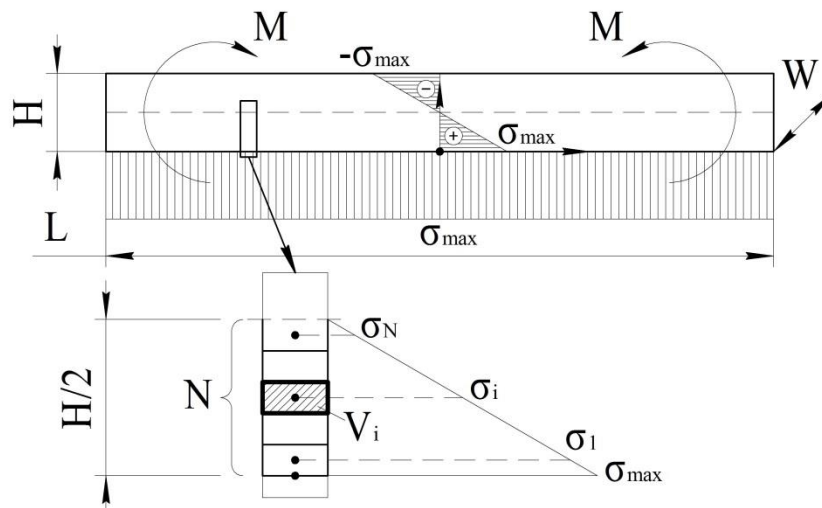


Рисунок 5 – Разбиение на элементарные объёмы для численного расчёта

Для различных значений  $N$  в таблице 1 и на рисунке 6 приведено сравнение численного решения с точным для случая чистого изгиба образца. Даже на самой грубой сетке конечных элементов  $N = 5$  численное решение по напряжениям получено с высокой точностью 2 %. Однако, из-за высокого градиента напряжений в каждом элементе ошибка для напряжённого объёма составляет 34 %.

Сравнение точного и численного решений

Таблица 1

| N   | Точное решение                          |                                    | Численное решение                    |                                                |                                                   |
|-----|-----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|     | $\sigma_{\max \text{ функц.}}$<br>[МПа] | $V_{\sigma}$<br>[мм <sup>3</sup> ] | $\sigma_{\max \text{ МКЭ}}$<br>[МПа] | $V_{\sigma \text{ МКЭ}}$<br>[мм <sup>3</sup> ] | $V_{\sigma \text{ функц.}}$<br>[мм <sup>3</sup> ] |
| 5   | 17,4927                                 | 133,6364                           | 17,8541                              | 87,9900                                        | 111,1032                                          |
| 8   |                                         |                                    | 17,5393                              | 118,7594                                       | 124,3739                                          |
| 10  |                                         |                                    | 17,4608                              | 127,6345                                       | 127,6404                                          |
| 20  |                                         |                                    | 17,4608                              | 132,1090                                       | 132,1151                                          |
| 40  |                                         |                                    | 17,4608                              | 133,2498                                       | 133,2552                                          |
| 100 |                                         |                                    | 17,4608                              | 133,5716                                       | 133,5755                                          |

После того, как численное решение по напряжениям стабилизировалось на максимально возможном для МКЭ точном уровне при  $N > 10$  и не зависит от дальнейшего сгущения сетки (сеточная сходимость), напряжённый объём, вычисленный с помощью МКЭ, практически совпадает с численным интегрированием функции напряжений. То есть дальнейшая ошибка для напряжённого объёма состоит только в дискретизации сетки. Стабилизация же значений напряжённого объёма, то есть достижение максимально точного численного решения, происходит на более густой сетке при  $N > 40$ , когда напряжённое поле в каждом элементе приближается к однородному. Точность при этом составляет десятые доли процента.

Так как напряжения, стоящие под знаком суммы в (14), возводятся в высокую степень (в практике обычно  $5 < m < 15$ ), то приобретает значение точность округления чисел. В данном примере принято четыре знака после запятой, но при возможности можно округлять и до более высокого порядка.

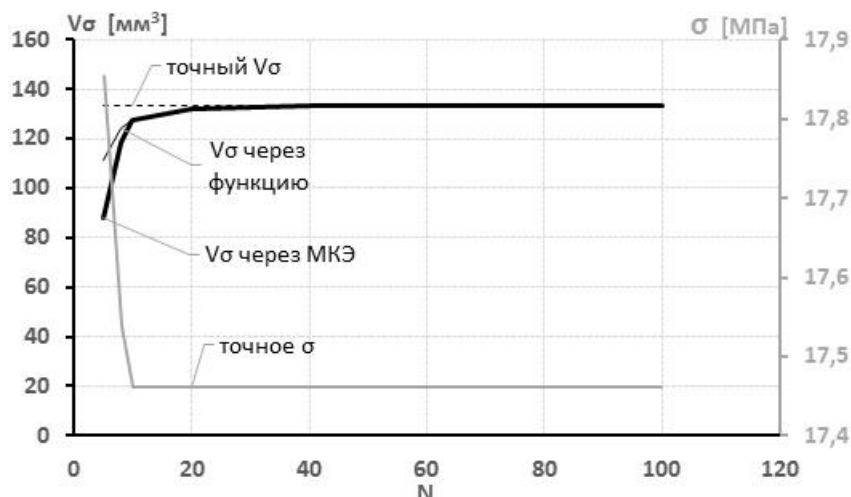


Рисунок 6 – Оценка точности численного решения

#### Заключение

Таким образом, приведенная в работе методика позволяет оценить напряжённый объём тела, к которому приложена какая-либо нагрузка, вызывающая в этом теле реакцию сопротивления нагрузке в виде распределения по объёму тела напряжений. Основной практический интерес расчет напряженного объема представляет при оценке несущей способности и вероятности разрушения натурного изделия в условиях эксплуатационного нагружения по результатам испытаний образцов материала, изготовленных из технологического припуска этого изделия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрейденталь А. М. Статистический подход к хрупкому разрушению. Сборник «Разрушение». Том 2. Математические основы теории разрушения. Под ред. А. Ю. Ишлинского. – М.: Мир, 1975. 764 с.
2. Волотин В. В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1965. 279 с.
3. Баринов С. М., Шевченко В. Я. Прочность технической керамики. – М.: Наука, 1996. 159 с.
4. Витицкий П. М., Попина С. Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения дефектных тел. – Киев: Наукова думка, 1980. 187 с.
5. Литвинов А. Н., Юрков Н. К. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях // Надежность и качество сложных систем. 2013, № 3. С. 25–31.
6. Северцев Н. А., Зацаринный А. А. Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы // Надежность и качество сложных систем. 2017, № 4 (20). С. 90–96. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-4-12.
7. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. Пер. с англ. Е.М. Морозова, В.М. Струнина. – М.: Мир, 1970. 444 с.
8. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. 624 с.
9. Гольденблат И. И., Колнов В. А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1968. 192 с.
10. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. 351 с.
11. Образцов И. Ф., Савельев Л. М., Хазанов Х. С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. – М.: Высшая школа, 1985. 392 с.

УДК 666.3:539.4.001.24:621.396

**Кирюшина<sup>1</sup> В.В., Коваленко<sup>2</sup> П.В., Рогов<sup>3</sup> Д.А.**

<sup>1,2,3</sup> ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, Обнинск, Россия

<sup>1,2,3</sup> info@technologiya.ru

### **ОПЫТ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** Рассмотрены подходы к оценке надежности (вероятности безотказной работы) высоконагруженных изделий специального назначения с элементами из керамических материалов на различных этапах их жизненного цикла. С учетом назначения и основных принципов функционирования сформулированы критерии предельных состояний изделий. На этапе проектирования в качестве модели надежности использована модель «нагрузка – несущая способность». Функция распределения максимальных расчетных напряжений получена с учетом вариабельности свойств конструкционных материалов и условий нагружения. Для оценки функции распределения прочностных свойств керамики применена модель хрупкого разрушения Вейбулла. На этапе изготовления и испытаний опытных образцов и этапе производства использована классическая схема из теории надежности с функцией стандартизированного нормального распределения параметра состояния, оцененного экспериментально.

**Ключевые слова:** вероятность безотказной работы, прочностная надежность, керамический материал, модель хрупкого разрушения, нормальный закон распределения, коэффициент запаса прочности

**Kiryushina<sup>1</sup> V.V., Kovalenko<sup>2</sup> P.V., Rogov<sup>3</sup> D.A.**

<sup>1,2,3</sup> ORPE "Technologiya" named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia

<sup>1,2,3</sup> info@technologiya.ru

### **EXPERIENCE OF RELIABILITY ASSESSMENT OF THE HIGH-LOADED PRODUCTS WITH COMPONENTS FROM CERAMIC MATERIALS**

**Abstract.** In work approaches to reliability assessment (probability of failure-free operation) of the high-loaded products to special purpose with ceramic components at various stages of their life cycle are considered. Limiting state criteria of products are formulated with purpose and principles of functioning. At the design stage model "loading-strength" is used as reliability model. The distribution of the maximum tensile stress is received with variability of properties of construction materials and loading conditions. The brittle failure statistical model (Weibull model) is applied as distribution of ceramic strength. At the fabrication and tests of prototypes and in production the classical approach from the theory of reliability with standardized normal distribution of experimental state parameter is used.

**Keywords:** strength reliability, probability of failure-free operation, ceramic material, brittle fracture model, normal distribution, safety factor

Необходимость в оценке надежности и подтверждении ее уровня требованиям технической документации возникает на всех стадиях жизненного цикла изделий и в соответствии с ГОСТ РВ 0027-102-2019 является неотъемлемой частью мероприятий по обеспечению надежности. Ввиду невозможности прямого изменения показателей надежности важную роль играют достоверные методы оценки.

В работе изложены подходы к оценке надежности высоконагруженных изделий специального назначения на этапах проектирования, изготовления и испытаний опытных образцов и серийного производства. Конструктивно рассматриваемые изделия состоят из тонкостенных оболочечных элементов из керамического и металлического материалов, телескопически соединенных между собой клеевым (или клее-механическим) способом. Согласно классификации ГОСТ РВ 27.3.01-2005 изделия относятся к невозстанавливаемым объектам однократного применения с предшествующим периодом ожидания, хранения и транспортирования. Основной количественный показатель их надежности – вероятность безотказной работы.

Предельными состояниями рассматриваемого типа объектов в эксплуатации, исходя из назначения и основных принципов функционирования, являются предельное состояние по несущей способности и предельное состояние по функционированию [1, 2]. Наступление предельного состояния приводит к отказу изделия.

Предельное состояние по несущей способности состоит в нарушении целостности изделия, которое возникает в случае превышения внешними нагрузками несущей способности изделия. Предельное состояние по функционированию заключается в выходе параметров, определяющих выполнение изделием возложенных на него функций, за допустимые границы.

Тогда оценка надежности в эксплуатации равна

$$P_{6.p.}(t) = P_{\Pi}(t) \times P_{\Phi}(t),$$

где  $P_{\Pi}$  – вероятность сохранения целостности изделия (прочностная надежность);  $P_{\Phi}$  – вероятность невыхода функциональных параметров за допустимые границы (надежность по функционированию).

На разных этапах эксплуатации изделие может находиться в различных условиях, которые характеризуются определенными видами и уровнями внешних воздействий. Наиболее нагруженным этапом эксплуатации изделия является применение по

основному назначению. При этом зачастую рассматривают надежность в самой опасной точке нагружения [3, 4].

В общем случае прочностная надежность есть

$$P_{\Pi} = \int_{-\infty}^{\infty} f_F(F) \int_F^{\infty} f_L(L) dL dF = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(L) \int_{-\infty}^L f_F(F) dF dL,$$

где  $F$  и  $L$  – внешняя нагрузка и несущая способность.

На этапе проектирования прочностная надежность определяется совместным наступлением двух независимых событий

$$P_{\Pi} = P_{\text{кер.}} \times P_{\text{соед.}},$$

где  $P_{\text{кер.}}$  и  $P_{\text{кл.}}$  – вероятности сохранения целостности керамического элемента и клеевого соединения при внешнем нагружении.

Вероятность сохранения целостности керамического элемента определяется непревышением максимальными напряжениями  $\sigma_{\max}$ , возникающими в конструкции под воздействием теплового и силового нагружения, предела прочности керамического материала  $[\sigma]$ . При этом максимальные напряжения и прочность материала являются случайными величинами.

С целью получения функции распределения максимальных расчетных напряжений использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [5]. Была проведена серия расчетов напряженно-деформированного состояния изделия при выбранных вариациях физико-механических и теплофизических свойств конструкционных материалов и условий нагружения. Для общности принято допущение, что все варьируемые свойства подчиняются нормальному закону распределения со средними значениями и разбросами, принятыми согласно паспортным данным на соответствующий материал. Для условий нагружения также выбран нормальный закон с номинальными значениями в качестве средних и 10% вариацией от номинала. С помощью критерия Колмогорова-Смирнова установлено, что наиболее подходящей к результатам расчета  $\sigma_{\max}$  оказалась функция нормального закона распределения.

В качестве функции распределения предела прочности керамического материала использована двухпараметрическая функция распределения Вейбулла, хорошо зарекомендовавшая себя в исследованиях разрушения хрупких материалов [6, 7]. Хрупким керамическим материалам свойственна масштабная зависимость деформационно-прочностных свойств, которая проявляется в потере несущей способности не только от максимальных напряжений, но и от размеров области, в которой эти напряжения действуют. Данный факт позволяет экстраполировать предел прочности, полученный на образцах керамического материала, на прочность изделия из данного материала.

На рисунке 1 изображены функция нормального распределения максимальных напряжений  $f(\sigma_{\max})$  и функция распределения Вейбулла предела прочности керамического материала  $f([\sigma])$  одного из разрабатываемых изделий при заданном нагружении. Площадь области пересечения данных кривых определяет вероятность разрушения керамического элемента. Тогда его прочностная надежность может быть найдена численно из выражения

$$P_{\text{кер.}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_{\sigma_{\max}}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{(\sigma - \bar{\sigma}_{\max})^2}{2S_{\sigma_{\max}}^2} - V_{ef} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)^m\right) d\sigma,$$

где  $\bar{\sigma}_{\max}$  и  $S_{\sigma_{\max}}$  – параметры распределения  $\sigma_{\max}$  (математическое ожидание и стандартное отклонение);  $m$  и  $\sigma_c$  – параметры распределения  $[\sigma]$  (модуль Вейбулла и параметр масштаба);  $V_{ef}$  – напряженный объем керамики (объем, находящийся под действием растягивающих напряжений).

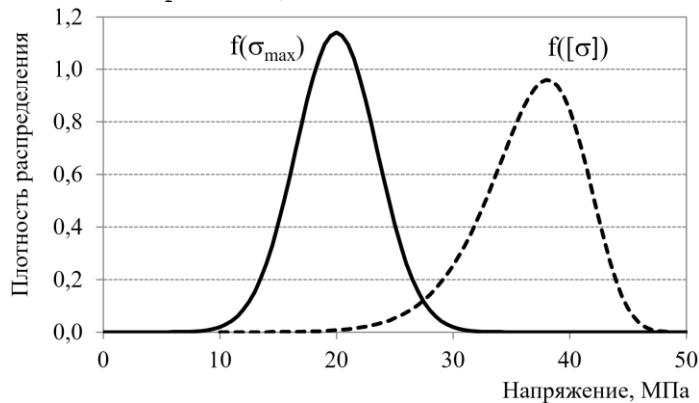


Рисунок 1 – Функции плотности распределения максимальных расчетных напряжений и предела прочности

Параметры функции распределения Вейбулла определены по результатам прочностных испытаний образцов материала. При этом дискуссионными остаются вопросы,



каким методом и на основе какой выборки оценивать данные параметры, и в частности такой важный параметр как модуль Вейбулла. Опыт проведения подобных расчетов показал, что оценки могут существенно отличаться друг от друга, что не позволяет задать их в качестве констант материала, а использовать скорее как характеристики стабильности технологического процесса производства за определенный временной период.

Применяя аналогичные рассуждения для оценки прочностной надежности соединения керамического и металлического элементов с тем исключением, что максимальные расчетные касательные напряжения  $\tau_{\max}$ , возникающие в материале клеевого соединения при заданном силовом и температурном нагружении, и предел прочности на сдвиг клея-герметика  $[\tau]$  не противоречат нормальному распределению, получим

$$P_{\text{соед.}} = \Phi \left( \frac{[\tau] - \bar{\tau}_{\max}}{\sqrt{S_{[\tau]}^2 + S_{\tau_{\max}}^2}} \right),$$

где  $\Phi()$  – функция стандартизированного нормального распределения;

$\bar{\tau}_{\max}$  и  $S_{\tau_{\max}}$  – математическое ожидание и стандартное отклонение  $\tau_{\max}$ ;

$[\tau]$  и  $S_{[\tau]}$  – математическое ожидание и стандартное отклонение  $[\tau]$ .

При наземной отработке и в серийном производстве качество изготовленных за определенный период изделий и соответствие их характеристик заданным требованиям подтверждается результатами предварительных и периодических испытаний натурных изделий (опытных образцов). Однако оценка надежности по схеме «успех-отказ» не применима, поскольку требует испытания большого количества изделий, что невозможно при требуемом уровне надежности 0,999 и выше.

Поэтому прочностная надежность оценивается по результатам натурных испытаний в условиях, приближенных к эксплуатационным, по формуле

$$P_{\Pi} = P(\eta > 1),$$

где  $\eta$  – коэффициент запаса прочности.

Преимущество использования коэффициента запаса, который представляет собой параметр состояния изделия, состоит в его безразмерности и независимости от конструктивных особенностей, видов нагружения и форм разрушения, что удобно для сравнения различных вариантов конструкции. При нормальном законе распределения  $\eta$ , который вытекает из рекомендаций [2, 3] и имеющегося многолетнего опыта испытаний, оценка  $P_{\Pi}$  преобразуется к виду

$$P_{\Pi} = \Phi \left( \frac{\bar{\eta} - 1}{S_{\eta}} \right),$$

где  $\bar{\eta}$  и  $S_{\eta}$  – математическое ожидание и стандартное отклонение  $\eta$ .

Применительно к рассматриваемым изделиям такой подход не лишен недостатков. Ограниченное количество дорогостоящих испытаний натурных изделий не позволяет собрать репрезентативную выборку для оценки параметров распределения коэффициента запаса  $(\bar{\eta}, S_{\eta})$  с приемлемым уровнем доверительной вероятности. Кроме этого, не всегда при проведении испытаний определяют предельные возможности конструкции. Сам параметр состояния  $\eta$  характеризует запас прочности только по одному из видов эксплуатационной нагрузки – силовому нагружению, не учитывая возрастающую при этом тепловую нагрузку.

Несмотря на отмеченные недостатки, коэффициент запаса прочности является важной количественной характеристикой, экспериментально подтверждающей работоспособность и надежность конструкции. Его использование в расчете прочностной надежности может быть обосновано искусственным расширением выборки экспериментальных данных, например, с помощью процедуры bootstrap [8].

Для оценки вероятности безотказной работы по функционированию рассматриваемых изделий возможно использование двух подходов, базирующихся на моделях «параметр-поле допуска»: метода, основанного на приближении Судакова (метод непревышения), и метода, основанного на теории выбросов случайных процессов [9–11]. На этапе проектирования расчет проводится по модельным зависимостям функциональных параметров, полученным с использованием математического моделирования физических законов; на этапе изготовления и испытаний опытных образцов и этапе серийного производства – по значениям функциональных параметров, непосредственно измеренным на изделии. Надежность по функционированию, как правило, достигается технологически с применением неразрушающих методов контроля, специальных доводочных операции, и находится на высоком уровне.

### Заключение

Материалы работы иллюстрируют подходы к оценке вероятности безотказной работы высоконагруженных изделий специального назначения с элементами из керамических материалов на этапах проектирования, изготовления и испытаний опытных образцов и серийного производства. Предложенные методы базируются не только на

математическом подходе к оценке надежности с использованием результатов испытаний и распределений параметров состояния изделий, но и на физическом подходе, учитывающем особенности разрушения керамического элемента, как слабого звена конструкции в условиях экстремального эксплуатационного нагружения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейковский В. А. Теория надежности: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
2. Апполонов И. В., Северцев Н. А. Надежность невосстанавливаемых систем однократного применения. – М.: Машиностроение, 1977. 212 с.
3. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. Под ред. И. А. Ушакова. Пер. с англ. Е.Г. Коваленко. – М.: Мир, 1980. 607 с.
4. Северцев Н. А., Зацаринный А. А. Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы // Надежность и качество сложных систем. 2017, № 4 (20). С. 90–96. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-4-12.
5. Власов М. А., Сергин С. Ф., Ермишова Т. В., Орлова Н. А. Планирование испытаний на прочностную надежность конструкций методом статистического моделирования // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 1. С. 154–157.
6. Фрейденталь А. М. Статистический подход к хрупкому разрушению. Сборник «Разрушение». Том 2. Математические основы теории разрушения. Под ред. А. Ю. Ишлинского. – М.: Мир, 1975. 764 с.
7. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1965. 279 с.
8. Орлов А. И. Прикладная статистика: учеб. для вузов. – М.: Экзамен, 2004. 483 с.
9. Левшанов В. С., Кирюшина В. В., Русин М. Ю. Оценка проектной надежности антенных обтекателей летательных аппаратов // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. № 3(11). С. 5–10.
10. Волков Е. Б., Судаков Р. С., Сырицын Т. А. Основы теории надежности ракетных двигателей. – М.: Машиностроение. 1974. 400 с.
11. Тихонов В. И., Хименко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987. 303 с.

УДК 537.222.4

**Михайлов<sup>1</sup> П.Г., Пасхин<sup>2</sup> И.Н.**

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> НПП «Импульс», Москва, Россия

<sup>1</sup> pit\_mix@mail.ru

<sup>2</sup> iluha1.1000@mail.ru

### **ТЕХНОЛОГИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЭЛЕКТРОАДГЕЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ СО СТЕКЛОМ**

**Аннотация.** Представлена технология низкотемпературного электроадгезионного соединения кремния со стеклом. Пары кремний – стекло соединяются при температуре и напряжении в диапазоне (200–430) °С и (0,2–2,5) кВ соответственно. Для подачи напряжения используются два разных электрода – точечный и плоский. Для различных толщин стекла и типов электродов исследованы низкие напряжения, низкая температура и короткое время соединения. Результаты показывают, что при использовании плоского электрода время соединения сокращается менее чем до 5 мин по сравнению с несколькими часами, получаемыми при использовании точечного электрода, и лишь незначительно зависит от толщины стекла. При использовании плоского электрода прочность соединяемых пар начинает превышать прочность объемного стекла при температуре 300 °С, и на высококачественном соединении не образуются пустоты. Эти результаты особенно интересны в случае низких температур и могут считаться лучшими по сравнению с другими результатами, широко представленными в литературе, с учетом более простой настройки и нового типа используемого электрода. Кроме того, продемонстрировано применение вышеупомянутых разработок для изготовления экспериментальных образцов чувствительных элементов и структур датчиков в лабораторных условиях. Здесь подтверждена совместимость пористого кремния и очень быстрого процесса соединения, выполняемого при низких температурах, чтобы предотвратить заполнение пор кремния термическими оксидами. Удовлетворительная прочность и качество соединения были получены при температурах до 200 °С, напряжении 2500 В и продолжительности процесса менее 1,5 мин.

**Ключевые слова:** электроадгезионное соединение, кремний, стекло, соединение, низкотемпературный, технология, MEMS

UDC 537.222.4

**Mikhailov<sup>1</sup> P.G., Pashkin<sup>2</sup> I.N.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> NPP "Impulse", Moscow, Russia

<sup>1</sup> pit\_mix@mail.ru

<sup>2</sup> iluha1.1000@mail.ru

### **TECHNOLOGY OF LOW-TEMPERATURE ELECTRO-ADHESIVE BONDING OF SILICON SENSOR ELEMENTS WITH GLASS**

**Abstract.** The article presents the technology of low-temperature electroadhesive bonding of silicon with glass. Silicon-glass pairs combine at a temperature and voltage in the range of (200–430) °C and (0.2–2.5) kV, respectively. Two different electrodes are used to supply voltage – a point electrode and a flat electrode. Low voltages, low temperature, and short connection times have been studied for various glass thicknesses and electrode types. The results show that when using a flat electrode, the connection time is reduced to less than 5 minutes compared to several hours obtained when using a point electrode, and only slightly depends on the thickness of the glass. When using a flat electrode, the strength of the connected pairs begins to exceed the strength of the bulk glass at a temperature of 300 °C, and no voids form on the high-quality joint. These results are particularly interesting in the case of low temperatures and can be considered better than other results widely reported in the literature, given the simpler setup and the new type of electrode used. In addition, the application of the above-mentioned developments for the manufacture of experimental samples of sensitive elements and sensor structures in laboratory conditions is demonstrated. Here, the compatibility of porous silicon and a very fast bonding process performed at low temperatures is confirmed in order to prevent the filling of silicon pores with thermal oxides. Satisfactory strength and quality of the joint were obtained at temperatures up to 200 °C, a voltage of 2500 V and a process duration of less than 1.5 minutes.

**Keywords:** electro-adhesive compound, silicon, glass, compound, low-temperature, technology, MEMS

ВВЕДЕНИЕ В последние годы технология соединения пластин из различных материалов стала незаменимым процессом при изготовлении устройств, связанных с микрообработкой. В связи с тем, что последние тенденции в микроэлектронике все больше и больше ориентированы на внедрение микроэлектромеханических систем (MEMS), снижение общей стоимости МЭМС становится жизненно важным [1]. Одним из основных факторов, влияющих на стоимость современных MEMS, является процесс электроадгезионного соединения (ЭАС). Технология ЭАС стала очень важной как для сборки, так и для общего вида MEMS-устройств [2]. Технологии для МЭМС выполняют все те же функции, что и для микросхем, но они значительно сложнее. Например, защита устройства от атмосферных воздействий, является одной из самых серьезных проблем, влияющих на долговечность и производительность МЭМС [3]. Более того, поскольку MEMS включают в себя подвижные конструкции, требования к соединению таких компонентов должны учитывать эти факторы. Некоторые функции МЭМС также включают взаимодействие с окружающей средой, например, датчики давления, поэтому сборка должна обеспечивать механическую стабильность чувствительного элемента (ЧЭ) и иных узлов. Как следствие, MEMS-сборка включает в себя два основных

процесса: микротехнологию и соединение пластин. Существует несколько методов соединения пластин, обеспечивающих их постоянную защиту и функциональность. В большинстве из этих методов стеклянная или кремниевая пластина используется в качестве пассивной защитной системы для MEMS-структур.

Наиболее распространенными методами соединения кремния со стеклом (К-С) являются: соединение сплавами, электроадгезионное соединение (ЭАС), низкотемпературное с использованием стеклоприпоев, эвтектическое и адгезионное [4].

В частности, метод ЭАС К-С вызвал значительный интерес у мировых изготовителей микросенсоров и микроприборов. Технология ЭАС (или электростатическим соединением) широко используется для соединения стеклянных пластин с другими проводящими материалами благодаря хорошему качеству соединения. Она основана на диффузии подвижных щелочных ионов в стекле при повышенных температурах под действием внешнего электростатического поля. Некоторые стекла типа Pyrex<sup>®</sup> имеют очень малую разницу в коэффициенте теплового расширения по сравнению с кремниевыми. Это, а также высокое содержание щелочных ионов делают их пригодными для использования с кремнием. Технология ЭАС в основном используется для изготовления датчиков давления и акселерометров [5, 6]. Этот процесс также используется для сборки кремниевых микроструктур первого порядка для изоляции от механических напряжений, вызванных сборкой. Благодаря тому, что чувствительная микроструктура прикреплена к относительно толстому (~ 1 мм) стеклянному основанию, устройство может быть установлено на печатных платах и других подложках, тепловое расширение которых не соответствует тепловому расширению кремния. Таким образом, области высоких напряжений, которые могли бы возникнуть в микроструктуре кремния, вместо этого возникают в стекле. Технология ЭАС обладает многими преимуществами, такими как высокая прочность соединения при относительно низких температурах. Это обеспечивает большую гибкость конструкции и возможность обработки пластин с лицевой и оборотной сторон. Преимущества ЭАС, о которых часто сообщается в специальной литературе, представлены в таблице 1.

Преимущества технологии ЭАС кремний-стекло и ее отличия. Таблица 1

|                                                      | Комментарии к характерным особенностям, описания                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Низкая температура соединения                        | - обеспечивает большую гибкость конструкции                                                                                                                                                                                                                     |
| Высокопрочное соединение                             | - превышает прочность стекла на разрыв                                                                                                                                                                                                                          |
| Термически подобранное соединение без напряжения     | - стабильные механические размеры в зависимости от температуры                                                                                                                                                                                                  |
| Плоская сборка                                       | - обеспечивает легкую гибридизацию на общей платформе                                                                                                                                                                                                           |
| Не происходит заметного растекания стекла,           | - что позволяет герметизировать ранее обработанные канавки, полости и т.д без нарушения допусков по размерам                                                                                                                                                    |
| Недорогая технология наклеивания пластин             | - при необходимости сборка для первого заказа может быть выполнена на уровне чипа                                                                                                                                                                               |
| Диэлектрическая изоляция стекла                      | Поскольку стекло является электрическим изолятором, паразитные емкости сохраняются на предельно низком уровне                                                                                                                                                   |
| Герметичные уплотнения                               | Процесс герметизации может быть легко выполнен в вакууме, что позволяет создавать герметичные эталонные полости (или герметизировать их специальными газовыми смесями)                                                                                          |
| Прозрачность стекла в оптическом диапазоне длин волн | Прозрачность обеспечивает простое, но высокоточное выравнивание стеклянных и кремниевых пластин с предварительно нанесенным рисунком. Эту прозрачность также можно использовать с помощью оптической адресации и "заглядывать" внутрь микрожидкостных устройств |
| Высокопроизводительный процесс,                      | Устойчив к загрязнению частицами и деформированию пластины (электростатическое поле создает высокую силу зажима, которая преодолевает эти неровности поверхности).                                                                                              |
| Многослойная технология                              | Многослойные стопки позволяют легко создавать сложные трехмерные микроструктуры                                                                                                                                                                                 |

Управляемые параметры процесса ЭАС включают величину приложенного напряжения, температуру, характер соединяемых поверхностей и время соединения. Как широко сообщается в известных источниках [1], диапазоны (0,8-1,5) кВ и (350-450) °С для приложенного напряжения и температуры, соответственно, позволяют завершить процесс за несколько минут и обеспечить хорошее качество соединения. Тем не менее,

вышеуказанные условия К-С могут привести к электрическим повреждениям (деградации, поломке и т.д.) при соединении пластин с обычными встроенными микросхемами (интегральными схемами) или механическим повреждениям (повреждениям, внутренним напряжениям, изгибам, структурным трещинам и т.д.) при соединении кремниевых пластин с термически несовместимыми материалами, такими как пьезоэлектрический литий ниобат ( $\text{LiNbO}_3$ ) и танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ), особенно важные для высокочастотных электронных систем и микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС). В этой статье предложено кремниевые и стеклянные пластины соединять по технологии ЭАС. Приведены электрофизические характеристики типичных параметров К-С, для исследования применимости минимально возможной температуры и приложенного электрического напряжения. Учитывались при этом продолжительность процесса, типы электродов и толщины стеклянных пластин, а также технологические параметры использования этого метода с точки зрения применимости результатов. Кроме того, работа была направлена на использование новых материалов и специализированных структур, которые будут соединены с кремнием по технологии ЭАС, для оптоэлектронных применений.

#### Экспериментальные исследования

Общие принципы технологического процесса электроадгезионного соединения

Низкотемпературное соединение металлов или полупроводников с помощью электрического поля с неорганическими диэлектриками и, в частности, с Пирексоподобным стеклом было изобретено Померанцем в 1968 году и запатентовано в США 3397278 [8]. Этот метод герметичного и прочного соединения стекла с кремнием без использования клеев. Кремниевые и стеклянные пластины нагреваются до температуры, при которой ионы щелочных металлов в стекле становятся подвижными

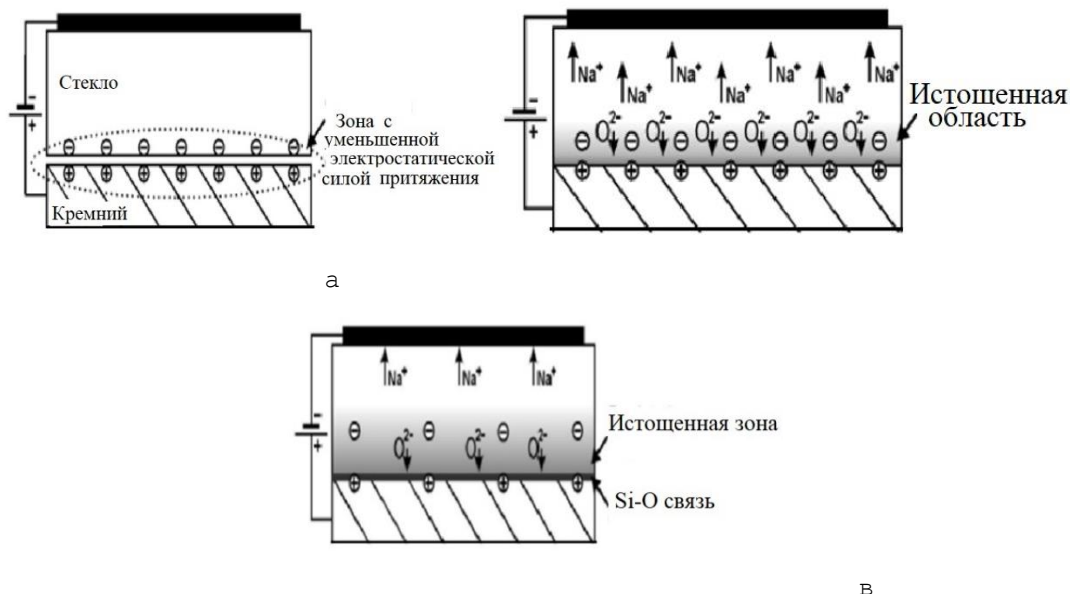


Рисунок 1 - Процесс соединения. (а) кремний и стекло соприкасаются под действием электростатической силы. (б) В результате нагрева в стекле генерируется ионный ток, который создает разряженную зону. (в) Ионы кислорода дрейфуют в электростатическом поле к границе раздела фаз, где они вступают в реакцию с кремнием и образуют связи Si-O.

Когда зона обеднения становится слишком большой, процесс прекращается. Из-за повышенной температуры ионы  $\text{Na}^+$  достаточно подвижны, поэтому Пирекс ведет себя как проводник. Следовательно, в самые первые моменты времени большая часть напряжения, подаваемого на сборку из кремния и Пирекса, падает через небольшой зазор в несколько микрон между двумя поверхностями. Сильное электрическое поле в этой области создает сильную электростатическую силу, притягивающую две поверхности друг к другу и образующую, таким образом, тесный контакт (рис. 1а). Кроме того, ионы  $\text{Na}^+$  начинают дрейфовать к отрицательному электроду, который соединен со стеклом, создавая зону разряда, прилегающую к кремниевому положительному электроду (рис. 1б). Во время этого процесса зарядки электрическое поле достаточно сильное, чтобы обеспечить приток кислорода к положительному электроду (кремний) вступает в реакцию с кремнием и образует соединение Si-O (рис. 1в). В результате стекло соединяется с кремнием прочной химической связью. Общие требования для успешного электроадгезионного соединения кремния и стекла приведены в таблице 2.

| Подробная информация о требованиях |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Повышенная температура             | – обычно $(350 \div 450)^\circ\text{C}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Внешнее электрическое поле–        | – обычно $(0.8 \div 1.5) \text{ kV}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Хороший контакт пластин            | – гладкие и плоские поверхности пластин. Микрошероховатость (Ra) < 10 или $40 \text{ \AA}$ ; деформация/изгиб < 5 мкм. Натриевое защитное стекло– требуется высокая подвижность щелочных ионов.                                                                                                                                                                              |
| Натриевое защитное стекло          | – Пример состава стекла: Пирекс: $\text{SiO}_2$ (79.6%), $\text{B}_2\text{O}_3$ (12.5%), $\text{Na}_2\text{O}$ (3.72%), $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2.4%) and $\text{K}_2\text{O}$ (0.02%); Borofloat 33: $\text{SiO}_2$ (80%), $\text{B}_2\text{O}_3$ (13%), $\text{H}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (2.5%), $\text{Na}_2\text{O}$ (3.5%) and $\text{K}_2\text{O}$ (1.0%) |
| Чистота поверхности                | – дисперсность размером 1 микрон образуется при пустоте в 1 см.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Гидрофильная поверхность           | Угол смачивания гидрофильной поверхности составляет около $7^\circ$ . обеспечивает хорошее поверхностное натяжение кремния                                                                                                                                                                                                                                                   |

## 2.2 Оборудование и экспериментальная установка

В последние годы было предложено множество коммерческих решений для комплексной обработки анодных соединений [9]. Большинство среди этого оборудования есть узкоспециализированные (вакуумная камера, инструмент для выравнивания, инфракрасный мониторинг, контроль с помощью камеры и т.д.) автоматическое или полуавтоматическое, автоматизированные и программируемые процессы. Кроме того, все они очень дороги. В случае лабораторных исследований и мелкосерийной обработки пластин, для проведения исследований и создания прототипов, важно ручное управление процессом и оперативный контроль за ходом процесса. Таким образом, у нас создана значительно более дешевая система ЭАС, включающая оборудование, гибкое для проведения исследований, без ограничений доступа и с полностью ручным управлением.

Принципиальная схема системы схема электроадгезионного соединения показана на рисунке 2.

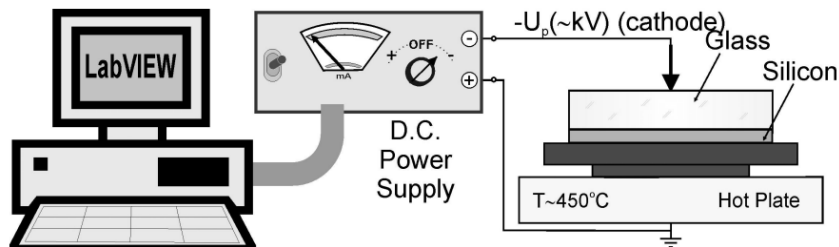


Рисунок 2 – Принципиальная схема ЭАС

Система состоит из мощной нагревательной плиты с постоянной температурой, высоковольтного источника постоянного питания, компьютерного интерфейса с платформой LabVIEW и пары электродов ("точечный" анод, крупноплощадный анод диаметром 3" и 4", весом 3 кг, изготовленный из бронзы). Все вышеперечисленное оборудование размещено в горизонтальном шкафу с ламинарным обдувом, воздух проходит через фильтр и закрывается внутри чистой комнаты (конечные показатели чистоты воздуха выше 10-го класса).

**2.3 Детали для эксперимента.** В данной работе использовались кремниевые пластины диаметром 2 дюйма, p-типа с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 2–4 Ом·см. Стекланные пластины диаметром 2 дюйма, типа Borofloat 33, толщиной 1 мм и 2 мм. Кремниевые пластины были изготовлены с помощью стандартного процесса влажной очистки, основанного на технологии очистки RCA (очищаются с помощью влажных химических ванн или плазменной технологии), который считается как хороший метод уменьшения угла контакта и активации поверхности. Стекланные пластины были изготовлены с использованием ацетона, дихромата калия ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) и изопропанола. Как кремниевые, так и стекланные пластины были подвергнуты окончательной обработке в среде  $\text{H}_2\text{O}_2$  для формирования гидрофильной поверхности. Для подачи напряжения использовались два разных электрода: точечный и плоский. Первый электрод был размещен примерно в центральной части пластины, в то время как плоский электрод покрывал всю поверхность. Здесь был исследован процесс взаимодействия кремния со стеклом в диапазонах температур и напряжений  $(200 \div 430)^\circ\text{C}$

и (0,2÷2,5) кВ соответственно [10]. Пары кремний-стекло были соединены в условиях чистоты, превышающих класс 10. Время ЭАС определялось в основном путем наблюдения за завершением соединения и видимыми пустотами (рис. 6). На рис. 3 показаны характеристики тока, измеренные для напряжения 400 В, стекла толщиной 2 мм и плоского электрода, определяющего температуру нагрева. ЭАС демонстрирует типичные характеристики тока при более высоких температурах (см. рис. 3), в то время как в случае низкой температуры или напряжения, ток становится ровным, не показывая какого-либо характерного изменения по времени.

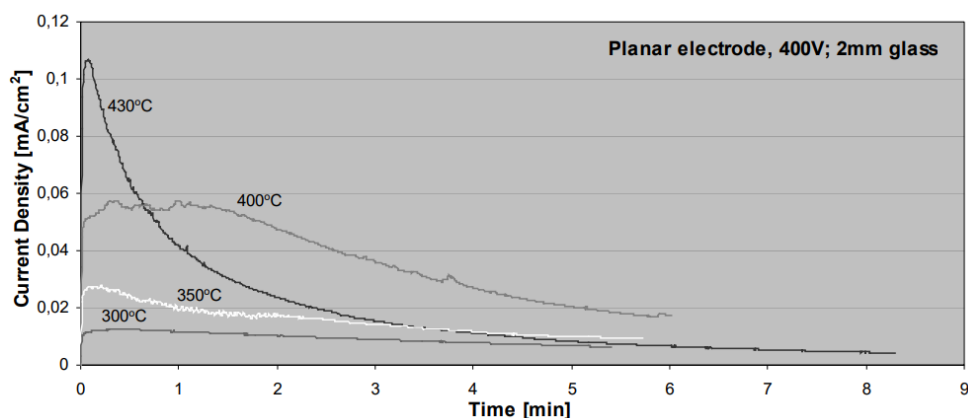


Рисунок 3 – Текущие характеристики процесса ЭАС, в качестве параметра которого используется температура. (вертикальная ось – плотность тока [мА/см<sup>2</sup>], горизонтальная ось время (минуты), на поле графика плоский электрод, 400 В; стекло 2 мм, температура нагрева 300°C, 350°C, 400°C, 430°C)

Для плоского электрода использовались напряжение 400 В и толщина стекла 2 мм. По этой причине были рассмотрены три различных метода определения завершения соединения: снижение тока и стабилизация после достижения четкого пика, визуальный осмотр области соединения и подсчет времени. Тем не менее, при низкой температуре или низком напряжении применим только метод, основанный на времени. Фактически, измеренный ток не показывает заметный пик, а в случае плоского электрода, визуальный осмотр затруднен, поскольку область соединения не видна. Таким образом, контроль времени для завершения процесса сварки становится важным, особенно когда плоский электрод покрывает всю площадь соединения. Временные характеристики представлены на рисунке 4 в зависимости от температуры и напряжения. Очевидно, что при тех же значениях температуры и напряжения плоский электрод значительно сокращает время процесса. На рисунке 5, в частности, показано, что во всем исследованном диапазоне температур и напряжений время обработки, требуемое для плоского электрода, составляет менее 8 минут. В отличие от этого, точечному электроду требуется несколько часов для полного соединения при низкой температуре (200°C). Эти результаты показывают, что в случае низкой температуры или низкого напряжения плоский электрод подходит для получения удовлетворительного анодирования за относительно короткое время.

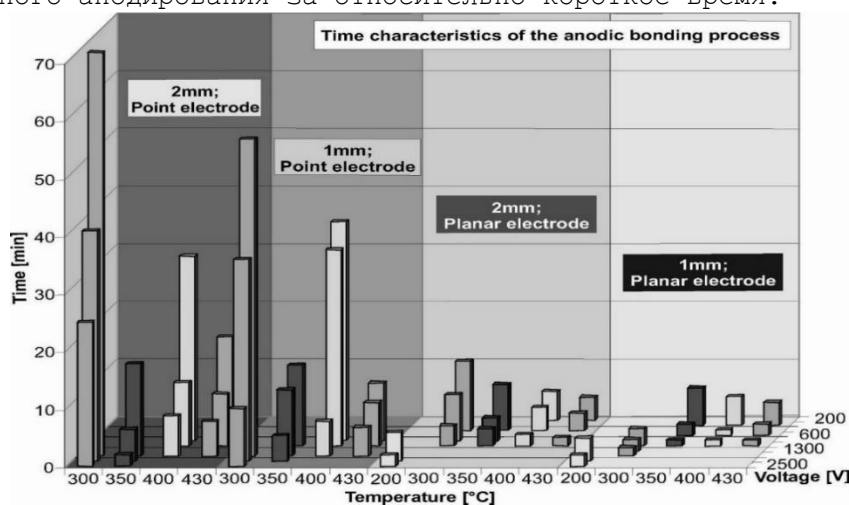


Рисунок 4 – Временные характеристики процесса ЭАС в зависимости от напряжения и температуры, в качестве параметров которых используются толщина стекла и тип электрода

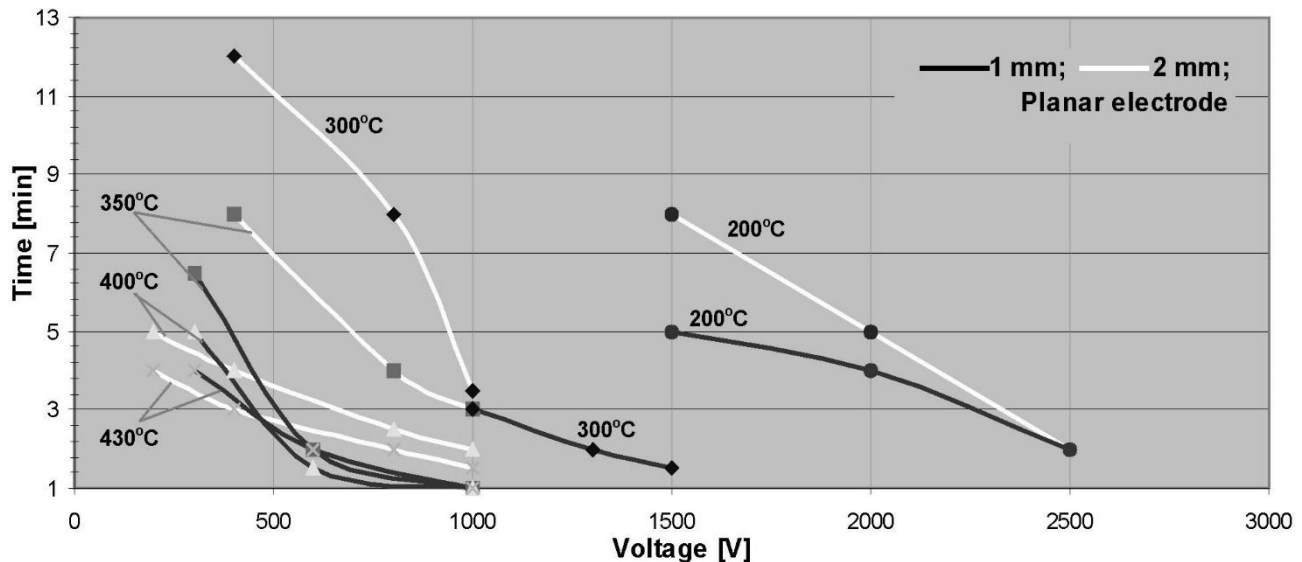


Рисунок 5 – Временные характеристики процесса ЭАС в зависимости от приложенного напряжения, в качестве параметров которых используются температура, толщина стекла и тип электрода

На рисунке 6 в качестве примера показана схема соединения пар кремний-стекло с использованием минимально возможных значений температуры и напряжения. Соответствующие параметры процесса приведены в таблице 3.

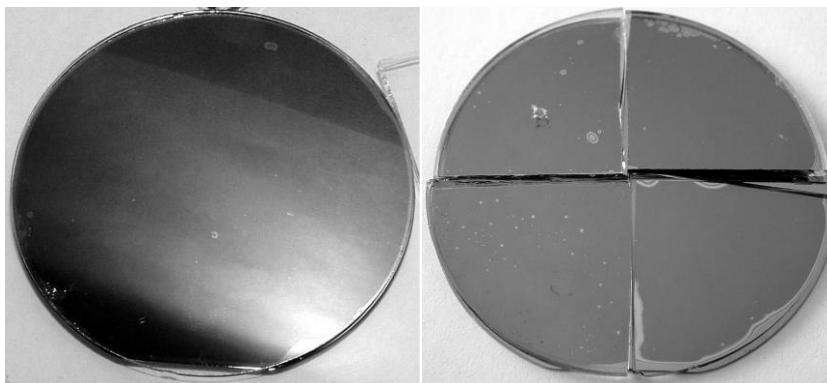


Рисунок 6 – Пары кремний-стекло – соединенные в неразъемный узел с использованием параметров процесса, указанных в таблице 3

Примеры важных значений технологических параметров, используемых в данной работе

Таблица 3

| Рисунок | Тип электрода | Толщина [мм] | Напряжение [V] | Температура [°C] | Время [мин] |
|---------|---------------|--------------|----------------|------------------|-------------|
| a)      | плоский       | 1            | 300            | 430              | 4           |
| b)      | точечный      | 2            | 1500           | 350              | 16          |
| c)      | плоский       | 2            | 200            | 430              | 4           |
| d)      | плоский       | 2            | 1000           | 350              | 3           |
| e)      | плоский       | 1            | 2500           | 200              | 2           |

Метод разрушения при вскрытии трещин, использованный для проверки соединяемых пар, показал, что прочность соединения увеличивается с повышением температуры, и при использовании плоского электрода она становится постоянной (по сравнению с прочностью стекла в объеме) при температуре 300°C. Этот результат можно считать лучшим, чем тот, который был представлен в других исследованиях [11], принимая во внимание также используемую здесь настройку. Кроме того, важно отметить, что все склеиваемые пары в диапазоне температур (200÷430)°C не содержат пустот. Было подтверждено, что температура является наиболее влияющим параметром в процессе ЭАС, что согласуется с другими аналогичными исследованиями, представленными в литературе и других источниках.

**Заключение** Стекло-кремниевые композиции на основе монокремния и щелочного стекла, соединенные с использованием ЭАС показали свою надежность и высокую прочность, поэтому были приняты в качестве базовых при изготовлении МЭМС и МЭД. В данной работе была представлена характеристика параметров ЭАС кремний-стекло в диапазонах температур и напряжений (200–430)°C и (0,2–2,5) кВ. Низкое напряжение, температура и время соединения были исследованы с учетом различной



толщины стекла и типа электрода. Результаты показывают, что все склеиваемые пары имеют хорошее качество и не содержат пустот. Прочность соединения увеличивается с повышением температуры и начинает быть удовлетворительной (по сравнению с прочностью объемного стекла) при температуре 350°C в случае точечного электрода и при температуре 300°C в случае плоского электрода. В данной работе была представлена характеристика параметров ЭАС кремний-стекло в диапазонах температур и напряжений (200 – 430)°C и (0,2–2,5) кВ. Низкое напряжение, температура и время соединения были исследованы с учетом различной толщины стекла и типа электрода. Результаты показывают, что все склеиваемые пары имеют хорошее качество и не содержат пустот. Прочность соединения увеличивается с повышением температуры и начинает быть удовлетворительной (по сравнению с прочностью объемного стекла) при температуре 350°C в случае точечного электрода и при температуре 300°C в случае плоского электрода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. –171с
2. Иванов С.В., Карелин Е.Ю. Основы технологии кремниевой микрообработки // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2011. – Т. 2. – С. 158-160.
3. Калинкина М.Е., Коробейников А.Г., и др. Анализ параметров интегральных датчиков давления с термостабильным чувствительным элементом // Научно-технический вестник Поволжья -2019. – № 1. – С. 81-83
4. Ануфриев Л.П., Бордусов С.В., Гурский Л.И., и др. Технология интегральной электроники. Минск: «Интегралполиграф», 2009. – 379 с
5. Михайлов П. Г., Лапшин В. И., Сергеев Д. А. Моделирование и проектирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 5. С. 128-133.
6. Pyotr Mikhailov, Zhomart Ualiev Problems of ensuring the stability of sensors and their relationship with general problems of ensuring the quality of the system //Web conferences MATEC 329, 03032 (2020) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903032> ICMTMTE 2020.
7. Михайлов П.Г., Михайлов А.П., Пасхини И.Н. и др. Методы обеспечения стабильности пленочных структур металлопленочных датчиков для ракетно-космической и авиационной техники" Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль" №4, 2024.
8. Daniel I. Pomerantz Aug. 13, 1968 United States Patent Office 3,397,278
9. Mikhailov P.G., Ualiev J. Issues of ensuring the stability of thin-film heterostructures of multifunctional sensors of information and measurement systems// FarEastCon 2020, 2020, 9271540. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85098916567&origin=resultslist>
10. K. Guo and G. K. Hu. Capacitive pressure sensor in sensor mode with large linear range and high sensitivity // 3rd IEEE International Conference on Nano/Microengineering and Molecular Systems. Sanya, 2008. pp. 796-800.
11. Hua T., Xiang Z., Xia X. [et al.]. A Sensitivity-Optimized Flexible Capacitive Pressure Sensor with Cylindrical Ladder Microstructural Dielectric Layers // Sensors. 2023. Vol. 23, № 9. P. 4323. doi: 10.3390/s23094323.

УДК 618.1

**Калютик<sup>1</sup> А.А., Панкин<sup>2</sup> А.М., Ефремов<sup>3</sup> В.Р., Павлов<sup>4</sup> И.А.**

<sup>1,2,3,4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНУТРИЗОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

**Аннотация.** Датчики прямого заряда (ДПЗ) используются для получения экспериментального распределения нейтронного потока по объему активной зоны ядерного реактора. В процессе кампании активной зоны под воздействием нейтронного потока происходит уменьшение количества вещества эмиттера датчика, генерирующего носители электрического заряда, которые и обеспечивают электрический ток, измеряемый во внешней цепи нейтронного детектора. Следствием этого является уменьшение чувствительности нейтронного детектора к потоку нейтронов. Между тем под воздействием того же нейтронного потока происходит выгорание сердечников тепловыделяющих элементов активной зоны, в результате чего уменьшается количество делящего вещества в виде урана-235. Это обстоятельство приводит к изменению размножающих свойств активной зоны. Для регулирования баланса между размножением нейтронов и их захватом в теплоноситель активной зоны добавляется некоторое количество борной кислоты, обеспечивающее дополнительный захват нейтронов активной зоны. Созданное на инженерном уровне программное обеспечение позволяет связать непосредственно измеряемые величины в виде показаний ДПЗ с косвенно определяемыми параметрами активной зоны в виде изменяющегося в процессе кампании активной зоны количества урана-235 в сердечнике твэла и бора-10 в составе теплоносителя. На основе контроля полученных параметров можно говорить о более надежном режиме работы активной зоны во время ее кампании.

**Ключевые слова:** датчики прямого заряда, активная зона, чувствительность детектора

**Kalyutik<sup>1</sup> A.A., Pankin<sup>2</sup> A.M., Efremov<sup>3</sup> V.R., Pavlov<sup>4</sup> I.A.**

<sup>1,2,3,4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

## **USAGE OF INTRAFAZE DETECTORS FOR MONITORING THE CONDITION OF ELEMENTS OF THE ACTIVE ZONE OF A NUCLEAR REACTOR**

**Abstract.** Direct charge sensors (DCS) are used to obtain an experimental distribution of the neutron flux over the volume of the nuclear reactor's core. During the core's campaign, the neutron flux reduces the amount of the sensor's emitter material, which generates electric charge carriers that provide the electric current measured in the neutron detector's external circuit. This results in a decrease in the neutron detector's sensitivity to the neutron flux. On the other hand, under the influence of the same neutron flux, the cores of the fuel elements of the core burn out, resulting in a decrease in the amount of fissile material in the form of uranium-235. This circumstance leads to a change in the breeding properties of the core. To regulate the balance between neutron multiplication and neutron capture, a certain amount of boric acid is added to the coolant of the core, which provides additional neutron capture in the core. The software developed at the engineering level allows for the connection of directly measurable quantities, such as the readings from the DPZ, with indirectly determined parameters of the core, such as the amount of uranium-235 in the core of the fuel element and the amount of boron-10 in the coolant, which changes during the core's campaign. By monitoring these parameters, it is possible to ensure a more reliable operation of the core during its campaign.

**Keywords:** direct charge sensors, active zone, detector sensitivity

Для определения характеристик активной зоны ядерного реактора используется система внутрореакторного контроля, в которую входят детекторы нейтронного потока в виде датчиков прямого заряда (ДПЗ), на основе показаний которых может быть построено распределение нейтронного потока по объему активной зоны ядерных реакторов различных типов. В работе [1] сообщалось о создании программного обеспечения для обработки показаний этих датчиков. Однако первоочередной задачей является контроль состояния самих детекторов нейтронного потока, характеристики которых изменяются в процессе эксплуатации под воздействием нейтронного потока.

К числу контролируемых параметров измерительной цепи датчика обычно относят следующие величины: сопротивление изоляции измерительного кабеля, генерирующая электрическая мощность эмиттера ДПЗ и емкость измерительной цепи. Для определения этих параметров используются статические и динамические режимы работы измерительной цепи ДПЗ, а также динамические режимы работы активной зоны ядерного реактора.

Во время всех режимов измерительной цепи датчика полагается, что ядерный реактор работает на одном и том же уровне мощности.

Если проводить измерения в двух статических режимах работы измерительной цепи ДПЗ, то могут быть определены два параметра этой цепи: мощность источника электрического тока и сопротивлению изоляции измерительного кабеля [2].

При использовании информации, получаемой в переходном процессе (включение и выключение дополнительного источника энергии в виде источника ЭДС), к этим двум

параметрам может быть добавлен и третий параметр цепи в виде электрической емкости между центральной жилой кабеля и его экраном. Оценка такого параметра имеет определенное значение для обработки результатов измерений на основе ДПЗ в динамических режимах работы ядерного реактора [3].

Для создания второго статического режима (помимо штатного режима эксплуатации) используем цепь, электрическая схема которой представлена на рисунке 1.

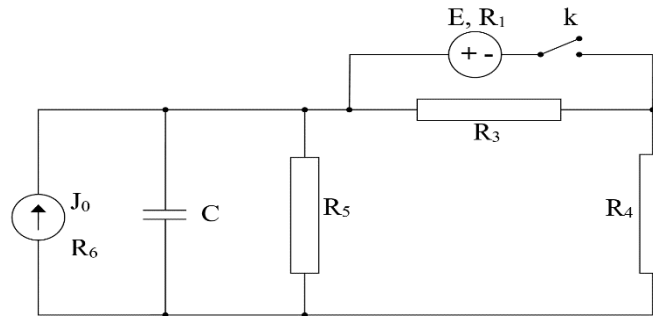


Рисунок 1 – Электрическая схема для создания второго статического режима

В соответствии с этой схемой при диагностировании создается статический режим, в котором участвует дополнительный источник напряжения (помимо источника тока  $J_0$ ), имеющий ЭДС, равную  $E$ , и внутреннее сопротивление  $r_0 = R_1$ .

На данной схеме представлены элементы: ДПЗ как источника электрического тока с параметрами  $J_0$ ,  $R_6$ ;  $C$  – емкость кабеля измерительной цепи;  $R_3$  – резистор, вводимый для обеспечения в дальнейшем диагностического режима;  $R_4$  – нагрузочное сопротивление, которое используется для измерения тока, протекающего в цепи датчик;  $R_5$  – сопротивление изоляции кабеля измерительного канала;  $R_6$  – внутреннее сопротивление источника тока;  $J_0$  – ток датчика на внутреннем участке цепи, обусловленный основными носителями заряда ( $\beta$ -частицы, которые появляются в процессе взаимодействия ядер эмиттера с нейтронным потоком). Величина  $J_0$  и представляет определяемый в дальнейшем параметр в виде генерируемой мощности источника тока в электрической цепи.

Для этой цепи можно записать систему алгебраических уравнений в виде уравнений Кирхгофа для токов и напряжений в элементах цепи (1):

$$\begin{cases} i_1 - i_3 - i_5 + i_6 = 0 \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ u_1 + u_3 = 0 \\ u_1 - u_4 + u_5 = 0 \\ -u_1 + u_4 + u_6 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E \\ u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{cases} . \quad (1)$$

В качестве третьего диагностического признака рассматривается величина емкости кабеля измерительной цепи  $C$ . Определение этой величины приобретает особое значение при проведении динамических режимов работы активной зоны ядерного реактора. Для нахождения этой величины в стационарных режимах работы ядерного реактора при организации переходных процессов в самой электрической цепи используем ту же схему, представленную на рис. 1.

Как было уже отмечено, после замыкания ключа  $k$  в электрической цепи детектора начинается переходный процесс, обусловленный наличием емкости  $C$  кабеля измерительной цепи.

Для определения величины  $C$  может быть записана система алгебраических и дифференциальных уравнений в виде (2):

$$\begin{cases} i_1 - i_3 + i_4 = 0 \\ i_2 + i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ u_1 + u_3 = 0 \\ -u_1 - u_2 + u_4 = 0 \\ -u_2 + u_5 = 0 \\ u_2 + u_6 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E \\ i_2 = C \frac{du_2}{dt} \\ u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{cases} , \quad (2)$$

где  $u_2$  – напряжение на емкости  $C$ ,  $i_2$  – ток через емкость  $C$ .

Для нахождения  $C$  измеряется тот же ток  $i_4$  через нагрузочный резистор  $R_4$  во время переходного процесса в электрической цепи и получается функция времени  $i_4 = i_4(t)$ .

Необходимо отметить, что из-за возможной скоротечности переходного процесса при малых значениях емкости  $C$ , имеется ограниченная возможность получения измерительной информации для определения этого параметра и, как следствие, точности его вычисления.

Для повышения объема информации предлагается к существующему объему информации, полученной в статических режимах на одном уровне мощности, добавить измерительную информацию, получаемую в статических режимах при работе на другом уровне мощности ядерного реактора.

Кроме этого, можно регистрировать информацию по изменению тока ДПЗ, получаемую при переходе с одного уровня мощности ядерного реактора на другой уровень в динамическом режиме работы активной зоны.

Полученная в этом режиме информация используется для повышения точности определения емкости измерительной цепи С.

При этом предлагается одновременно с определением величины С определять и генерирующую способность эмиттера как функцию от времени  $J_0(t)$  и на основе этой функции вычислять локальные коэффициенты реактивности активной зоны в местах расположения датчиков системы внутриреакторного контроля (СВРК). Для этого по величине тока  $i_4(t)$  в динамическом режиме вычисляют функцию  $J_0(t)$  по формуле (3):

$$J_0(t) = C(R_3 + R_4) \frac{di_4(t)}{dt} + i_4(t)(1 + (R_3 + R_4) * (R_5 + R_6)/(R_5 R_6)). \quad (3)$$

На основе вычисленной функции  $J_0(t)$  появляется возможность уточнять величину чувствительности детектора  $S = J_0/F$  ( $F$  – величина нейтронного потока в месте расположения датчика), которая изменяется в процессе кампании ядерного реактора по причине выгорания ядер эмиттера ДПЗ. Эта величина требуется для перехода к величине нейтронного потока при работе реактора в стационарных режимах.

После уточнения на основе выполненных диагностических измерений параметров самого ДПЗ в работе предлагается использовать измерительную информацию, получаемую с этого датчика для оценки параметров других элементов активной зоны.

На основе измерений в динамических режимах работы активной зоны можно получать локальные коэффициенты реактивности, характеризующие размножающие свойства отдельных частей активной зоны.

Величина реактивности в ядерном реакторе представляет интегральную величину, характеризующую процесс размножения нейтронов в активной зоне. В традиционном подходе она определяется на основе показаний ионизационных камер, находящихся вне активной зоны ядерного реактора. Таким образом, при ее нахождении учитываются только те нейтроны, которые попадают в ИК из ее ближайшего окружения без учета реального распределения нейтронного потока по объему активной зоны. Для определения такой реактивности используется цифровой реактиметр, математическая модель которого представляется хорошо известным выражением для вычисления реактивности в модели точечной кинетики реактора [4, 5]. Необходимые константы по запаздывающим нейтронам могут быть взяты из общеизвестных источников [6].

Выражение для реактивности получается на основе метода обращенного решения уравнений кинетики в дискретных точках по времени [4]. Это выражение может быть представлено в виде:

$$\frac{\rho}{\beta} = \frac{\Lambda}{\beta} \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} + \frac{1}{P(t)} \int_{-\infty}^t \sum_{j=1}^M \alpha_j P(t') \exp[-\lambda_j(t-t')] dt' \quad , \quad (4)$$

где:  $\frac{\rho}{\beta}$  – реактивность в отн. ед.,  $\Lambda$  – время генерации мгновенных нейтронов,  $\beta$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов,  $P(t)$  – мощность реактора,  $\lambda_j$  – постоянная распада  $j$ -й группы ядер-предшественников запаздывающих нейтронов,  $\alpha_j$  – нормировочный коэффициент для  $j$ -й группы запаздывающих нейтронов,  $M$  – число групп запаздывающих нейтронов.

При этом под реактивностью понимается параметр, определяющий отклонение среды, в которой протекает цепная ядерная реакция, от критичности таким образом, что положительные значения параметра соответствуют надкритическому состоянию, отрицательные – подкритическому.

Величина реактивности  $\rho$  вычисляется по формуле:  $\rho = \frac{k_{эфф}-1}{k_{эфф}}$ , где  $k_{эфф}$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов.

На вход цифрового реактиметра поступает импульсно-токовая аналоговая информация в виде скорости счета  $N$ , а на его выходе определяется реактивность  $\rho(t)$ , в соответствии с формулой (4) и с учетом того, что  $P(t) = N(t)$ . Во входном блоке реактиметра фильтруется аналоговый сигнал, который затем преобразуется в цифровой сигнал. Диапазон изменения входного сигнала может составлять  $10^3 - 10^6$  имп./с в импульсном режиме и  $10^{-8} - 10^{-3}$  А в токовом режиме.

В реактиметре непрерывно вычисляется реактивность в диапазоне от  $-25 \frac{\rho}{\beta}$  до  $0.9 \frac{\rho}{\beta}$  с определенной частотой дискретизации. Возможна операция сглаживания выходного сигнала. При этом величина коэффициента реактивности вычисляется по выходным сигналам ионизационных камер (ИК) системы управления и защиты (СУЗ).

Полученные коэффициенты не дают представления о пространственном распределении величины реактивности по объему активной зоны.

В настоящей работе для вычисления реактивности по изменяющемуся нейтронному потоку, полученному по токовому сигналу ДПЗ, была использована расчетная программа, реализующая формулу, похожую на формулу (4). Заметим что и выходной ток ИК и выходной сигнал ДПЗ, находящегося вблизи от этой ИК зависят от величин нейтронного потока вблизи поверхностей нейтронных детекторов. Поскольку между потоками нейтронов, падающих на поверхность этих детекторов, существует некоторая связь, определяемая расчетным путем в разные моменты кампании активной зоны ядерного реактора, то и между выходными сигналами детекторов в динамических режимах может иметь место некоторая корреляционная зависимость. Для ее определения в выходной токовый сигнал ДПЗ необходимо ввести поправки, определяемые на основе представленной выше информации.

В данной работе для оценки изменения размножающих свойств отдельных частей (объемов) активной зоны в процессе ее кампании предлагается рассматривать коэффициенты динамики нейтронного потока, определяемые как относительные изменения нейтронного потока за единицу времени при введении конкретной величины реактивности. Величина реактивности, вводимой в активную зону в том или ином динамическом режиме, может определяться по показаниям ионизационных камер. Коэффициенты динамики определяются по величине токового сигнала ДПЗ, находящегося в конкретном объеме активной зоны.

Особое значение для детализации коэффициентов динамики имеет большое количество датчиков ДПЗ в СВРК реактора ВВЭР-1200, позволяющее давать оценки по степени динамики нейтронного потока не только по высоте активной зоны, но и по радиусу при рассмотрении активной зоны в  $(r, z)$  геометрии.

На рисунке 2 показан высотный профиль распределения токовых сигналов ДПЗ, который был получен для одного из измерительных каналов системы внутриреакторного контроля (СВРК) ВВЭР-1200 на основе данных по 7-ми датчикам.

Таким образом, полученные на основе таких токовых сигналов в динамическом режиме работы активной зоны коэффициенты реактивности, уже могут дать некоторое представление о пространственном распределении величины реактивности, как интегральной величины. При этом речь идет о той части объема активной зоны, которая находится в зоне нейтронного потока, определяющего токовые величины рассматриваемых датчиков.

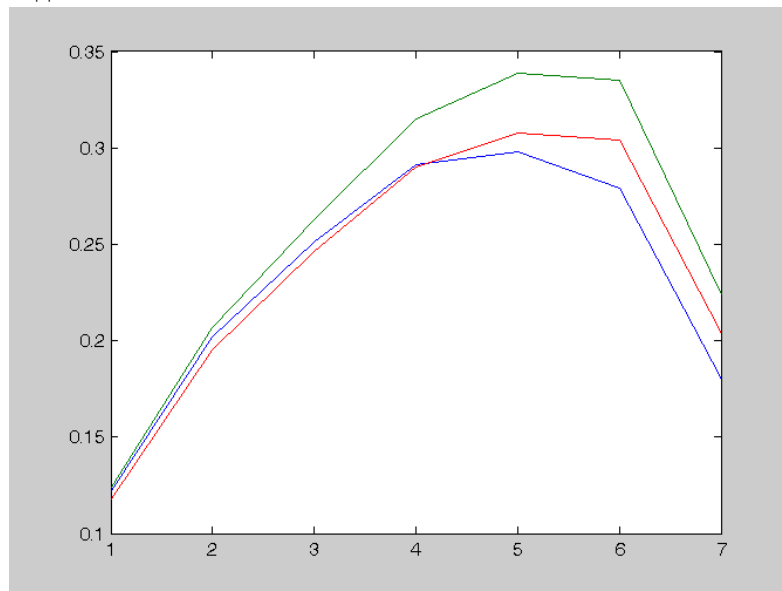


Рисунок 2 – Распределение токовых сигналов по высоте активной зоны в одном из каналов с ДПЗ для разных моментов времени в динамическом режиме

Есть еще одна задача, которая может быть решена на основе показаний ДПЗ в стационарных режимах работы ядерного реактора. В данной работе предлагается рассмотреть задачу оценки состояния нейтронного потока у поверхности тепловыделяющего элемента, который находится в непосредственной близости от того ДПЗ, электрический ток которого регистрируется системой внутриреакторного контроля. Напрашивается некоторая аналогия между эмиттером ДПЗ и сердечником твэла как поглотителями тепловых нейтронов

Объединяющим фактором, влияющим на оба процесса и устанавливающим между ними связь, является нейтронный поток, падающий на поверхность этих элементов активной зоны.

По упрощенной модели, не учитывающей пространственные и энергетические распределения ряда нейтронно-физических величин, а также размеры детектора, количество взаимодействий с делением горючего в твэле в ед. времени будет равно:

$$N_T = F_0 \cdot \Sigma_f = F_0 \cdot \sigma_f \cdot \rho_T, \quad (5)$$

где  $F_0$  – значение плотности нейтронного потока;  $\sigma_f, \rho_T$  – микросечение деления и ядерная плотность  $U-235$ .

Аналогично, количество взаимодействий нейтронного потока с ядрами эмиттера ДПЗ запишем в виде (6)

$$N_d = F_0 \cdot \Sigma_a = F_0 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot C_0, \quad (6)$$

где  $C_0$  – концентрация **Rh-103** в эмиттере ДПЗ, а микросечения  $\sigma_1, \sigma_2$  определяют вероятность перехода **Rh-103** в основное и возбужденное состояние **Rh-104** в результате реакции ( $n, \gamma$ ).

Если предположить примерно равный нейтронный поток у поверхности твэла и детектора, то на основе формул (5) и (6) получается соотношение (7):

$$\frac{N_T}{\sigma_f \cdot \rho_T} = \frac{N_d}{(\sigma_1 + \sigma_2) \cdot C_0}. \quad (7)$$

Соотношение (7) демонстрирует некоторую взаимосвязь между характеристикой детектора, изменяющейся в процессе кампании активной зоны ядерного реактора ( $C_0$ ), и характеристикой тепловыделяющего элемента из ближайшего окружения ДПЗ в виде плотности его делящегося вещества ( $\rho_T$ ), которая также изменяется в процессе выгорания активной зоны.

Соотношение (7) может быть уточнено на основе использования расчетных кодов, позволяющих получать относительное распределение нейтронного потока по тепловыделяющей сборке с ДПЗ.

Знание такого распределения нейтронного потока в зоне данного ДПЗ и окружающих его твэлов может дать информацию о количестве нейтронов, поглощаемых сердечником твэла. Для получения распределения нейтронного потока в данной работе предлагается, в качестве одного из возможных подходов, использовать созданную инженерную расчетную программу, в которой реализован алгоритм метода вероятности первого столкновения (ВПС).

#### Заключение.

В работе предложены подходы к решению нескольких задач с использованием экспериментальной информации, получаемой на основе внутризонных детекторов нейтронного потока в виде ДПЗ:

1. Повышение точности контроля технического состояния элементов измерительной цепи ДПЗ в статических и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора за счет повышения объема диагностической информации.
2. Получение локальных коэффициентов реактивности для сравнения с интегральными величинами реактивности, которые находятся по показаниям внезонных нейтронных детекторов в виде ионизационных камер системы управления и защиты.
3. Использование токовой информации с ДПЗ для оценки нейтронного потока и степени выгорания сердечников твэлов из состава ближайшего окружения ДПЗ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкин А.М., Костарев В.С. Программное обеспечение для обработки показаний датчиков прямого заряда ядерного реактора. Труды междунар. симпоз. «Надежность и качество». Пенза 27.05-1.06.2024. Пенза : Изд-во Пенз. ГУ, 2024. Т. 1. С. 326-327.
2. Панкин А.М., Коровкин Н.В. Диагностические признаки при контроле технического состояния ДПЗ ядерного реактора // Атомная энергия, 2017, т. 122, вып. 4. С. 235-238.
3. Пат. РФ 2783505. Способ контроля технического состояния датчика прямого заряда системы внутриреакторного контроля ядерного реактора / А. М. Панкин, Н. В. Коровкин, А. А. Калютник. Опубл. 14.11.22. Бюл. № 32.
4. Казанский Ю. А. Кинетика ядерных реакторов. Учеб. пос.-Обнинск, ИАТЭ, 2003. 96 с.
5. Василенко В. А., Панкин А.М., Скворцов К.В. Калибратор реактивности // Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 3. С. 141-145.
6. Дж.Р. Кипин. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат. 1967. 428 с

УДК 681.518.5

**Боровик<sup>1</sup> С.Ю. , Секисов<sup>2</sup> Ю.Н.**

<sup>1,2</sup> Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Самара, Россия

<sup>1</sup> borovik@iccs.ru

<sup>2</sup> sekisov@iccs.ru

## **ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ**

**Аннотация.** Рассматривается возможность создания средств неразрушающего контроля технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса силовых установок для изделий авиационно-космической техники на основе применения одновитковых вихретоковых датчиков. Анализируется круг задач, которые могут быть решены с помощью указанных технических средств и предлагаются возможные способы реализации подобных систем контроля и диагностики, обеспечивающие переход от регламентного обслуживания образцов сложной техники к их обслуживанию по фактическому состоянию.

**Ключевые слова:** объекты авиационной и ракетно-космической техники, силовые установки, контроль технического состояния, одновитковые вихретоковые датчики, моделирование, оценка остаточного ресурса

**Borovik<sup>1</sup> S.Yu. , Sekisov<sup>2</sup> Yu.N.**

<sup>1,2</sup> Institute of Complex Systems Management of the Russian Academy of Sciences of Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

<sup>1</sup> borovik@iccs.ru

<sup>2</sup> sekisov@iccs.ru

## **DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION AND ASSESSMENT OF THE RESIDUAL RESOURCE OF AVIATION AND SPACE TECHNOLOGY OBJECTS BASED ON THE USE OF SINGLE-WIRE VORTEX SENSORS**

**Abstract.** The article considers the possibility of creating non-destructive means of monitoring the technical condition and predicting the residual resource of power plants for aerospace products based on the use of single-coil eddy current sensors. The article analyzes the range of tasks that can be solved using these technical means and proposes possible ways to implement such monitoring and diagnostic systems, which allow for the transition from routine maintenance of complex equipment to its actual condition-based maintenance.

**Keywords:** aviation and rocket and space engineering facilities, power plants, technical condition monitoring, single-coil eddy current sensors, modeling, residual resource assessment

### **ВВЕДЕНИЕ**

Авиационная и ракетно-космическая промышленность относится к числу отраслей, обеспечивающих обороноспособность и связанность территории страны. Аэрокосмическое производство требует разработки, изготовления, сборки, контроля и проверки огромного числа комплектующих, включая авиационные и ракетные силовые установки (СУ). Одним из основных требований, предъявляемых к данному виду техники, является обеспечение высокой надежности изделий и безопасность их эксплуатации. Поэтому неперенным атрибутом и составной частью практически всех этапов жизненного цикла объектов авиационной и ракетно-космической техники (АиРКТ) является контроль технических и эксплуатационных характеристик изделий, который на этапе проектирования позволяет оценить перспективы предлагаемых подходов и возможность достижения поставленных целей, при производстве – обеспечить контроль качества выпускаемой продукции, а на этапе эксплуатации – решить задачу поддержания требуемого уровня эксплуатационной надежности.

Применительно к задачам контроля рабочих параметров СУ изделий АиРКТ (температур, давлений, запасов и расхода рабочих жидкостей и газов, частот вращения роторов, угловых или линейных перемещений элементов конструкций и т.д.) следует отметить, что получение соответствующей измерительной информации зачастую происходит в условиях, которые можно отнести к тяжелым, а в некоторых случаях и к экстремальным. Сложность и высокая стоимость изделий и компонентов АиРКТ, а также технологические ограничения на применение и расположение технических средств контроля на объекте, приводят к тому, что получение оперативных данных часто сопровождается сложной информационной ситуацией и характеризуется значительной априорной неопределенностью информации как о свойствах самого изделия, так и о факторах внешней и внутренней среды, влияющих на его функционирование и функционирование используемых технических средств.

Известно, что во многих задачах диагностики и дефектоскопии авиационных и ракетных двигателей применяют вихретоковые преобразователи (ВТП) [1–6], которые обеспечивают получение измерительной информации бесконтактным способом и нечувствительны к неэлектропроводным неферромагнитным материалам и средам в зоне контроля (грязь, пыль, масло и т.д.). Это во многом и предопределяет

привлекательность использования ВТП в тяжелых условиях эксплуатации. Отдельной разновидностью ВТП, нашедших применение в задачах экспериментальных исследований газотурбинных двигателей (ГТД) наземного и авиационного применения, а также компонентов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), являются одновитковые вихре-токовые датчики (ОВТД) [4, 7–10]. В отличие от традиционных ВТП, где в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) используются многовитковые катушки, требующие высокотемпературной изоляции, ЧЭ ОВТД представляет собой одиночный виток тока или его фрагмент (обычно в виде линейного отрезка проводника), а потому возможность применения такого датчика в экстремальных условиях определяется только конструктивной и температурной прочностью материала, из которого изготовлен ЧЭ. Например, на основе ОВТД были разработаны компьютеризированные системы измерения, которые применялись в длительных стендовых испытаниях полноразмерных ГТД и предоставляли разработчикам документированные данные о радиальных зазорах (РЗ) в газовоздушном тракте двигателя, осевых перемещениях валов, наличии частиц изнашивания в маслопроводах систем смазки двигателей и т.п. [6, 11–15].

В то же время, несмотря на общность решаемых с помощью ОВТД задач контроля технического состояния СУ изделий АиРКТ, существующие разработки и опубликованные результаты их применения зачастую носят разрозненный характер. Поэтому представляется необходимым и обоснованным проанализировать и обобщить имеющиеся решения, определив максимально возможный круг задач технической диагностики, для которых эффективным будет применение ОВТД и систем на их основе. Рассмотрению этих вопросов и посвящена настоящая статья.

#### ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ОВТД

Подробные описания базовой конструкции ОВТД можно найти в многочисленных публикациях, включая работы [7, 9, 10, 11]. В тоже время понимание последующего материала будет не полным без краткого изложения особенностей получения информации с помощью ОВТД, включая особенности преобразования информативных параметров датчиков.

Несмотря на большое разнообразие вариантов конструкций ОВТД, все они могут быть разделены на две группы: ОВТД, в которых в качестве ЧЭ используется виток (контур) с током целиком (рис. 1, а) и ОВТД с ЧЭ в виде фрагмента витка с током (обычно – линейный отрезок проводника, рис. 1, б) [4, 6, 15].

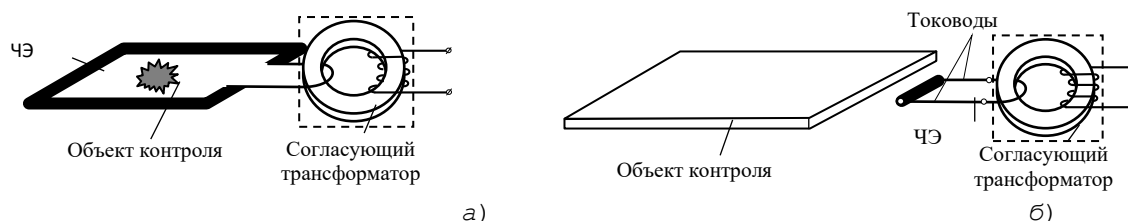


Рисунок 1 – ОВТД с ЧЭ в виде одиночного контура с током (а) и ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника (б) [6, 15]

Функционирование ОВТД в экстремальных условиях эксплуатации обеспечивается простейшей конструкцией его ЧЭ, механическая и термическая прочность которого определяется только свойствами используемого материала. Например, для ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника, применяемых для контроля зазоров в проточной части ГТД, при изготовлении деталей датчика из авиационных жаропрочных сплавов (ЕІ868, ХН60ВТ [16]), ЧЭ сохраняет свою конструктивную прочность при температурах в газовоздушном тракте двигателя свыше 1000°С.

Величина собственной индуктивности одновиткового ЧЭ очень мала (обычно несколько нГн) и для его подключения к измерительной цепи (ИЦ) используется согласующий трансформатор, который при необходимости выносится с помощью тоководов из зоны высоких температур в зону с благоприятными внешними условиями.

Еще одной особенностью ОВТД, отличающей данный тип датчиков от традиционных ВТП, является импульсный режим питания, который обеспечивает повышение уровня амплитуды сигнала за счет увеличения величины напряжения импульса. Сохранение теплового режима датчика при этом достигается путем уменьшения длительности импульсов. При импульсном питании сигнал на выходе ИЦ также имеет импульсный характер, что значительно упрощает дальнейшую коммутацию и аналого-цифровое преобразование. Кроме того, выбирая определенным образом соотношение между длительностью импульса питания и постоянной времени ИЦ можно обеспечить максимальное быстродействие и получить эффект подавления влияний неинформативных параметров, в частности активного сопротивления, изменяющегося в широких пределах от температуры в зоне измерения [17].

Обычно контролируемый с помощью ОВТД объект (торец лопатки, вал, частица изнашивания и т.п.) совершает сложное перемещение, которое в системе отсчета,



привязанной к ЧЭ датчика, можно охарактеризовать как многокоординатное. Сигнал ОВТД интегрально содержит информацию о всех составляющих такого перемещения, которые в контексте решаемой измерительной задачи могут быть как информативными (полезными), так и мешающими, затрудняющими корректное определение контролируемых параметров. Для измерения многокоординатных перемещений элементов конструкций контролируемых объектов обычно используют кластерные методы, предусматривающие размещение в зоне контроля групп одинаковых датчиков, ЧЭ которых определенным образом ориентированы относительно контролируемой поверхности, а число ОВТД в составе кластера соответствует числу искомым координат [12, 13, 17]. Вычисление координатных составляющих перемещений объекта, как контролируемых, так и мешающих, осуществляется путем совместной обработки результатов совокупных измерений всеми ОВТД кластера.

ЭЛЕМЕНТЫ ОБЪЕКТОВ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ, ДОСТУПНЫЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОВТД

Одна из возможных классификаций объектов АиРКТ представлена на рис. 2. Для ее построения использовались источники [18, 19]. Объекты, элементы которых доступны для контроля с помощью ВТП, на рис. 2 затемнены.



Рисунок 2 – Классификация объектов АиРКТ

Учитывая особенности ОВТД и, в частности, способность датчиков данного типа функционировать в условиях экстремальных температур, наиболее перспективными областями их применения являются СУ объектов АиРКТ, хотя известны и публикации [9, 10], в которых приводятся примеры применения ОВТД для контроля и других элементов, включая обнаружение соприкосновения створок солнечных панелей космических аппаратов и измерение зазоров между торцами лопастей винтов и статорной оболочкой закапотированной винтовентиляторной установки.

Одна из возможных классификаций СУ АиРКТ приведена на рис. 3. Она не претендует на полноту, однако содержит практически исчерпывающий перечень видов двигательных установок, элементы которых доступны для контроля с помощью ОВТД или их кластерных композиций (перспективные электрические и комбинированные СУ АиРКТ на рис. 3 не отражены в виду их малой распространенности в настоящее время).

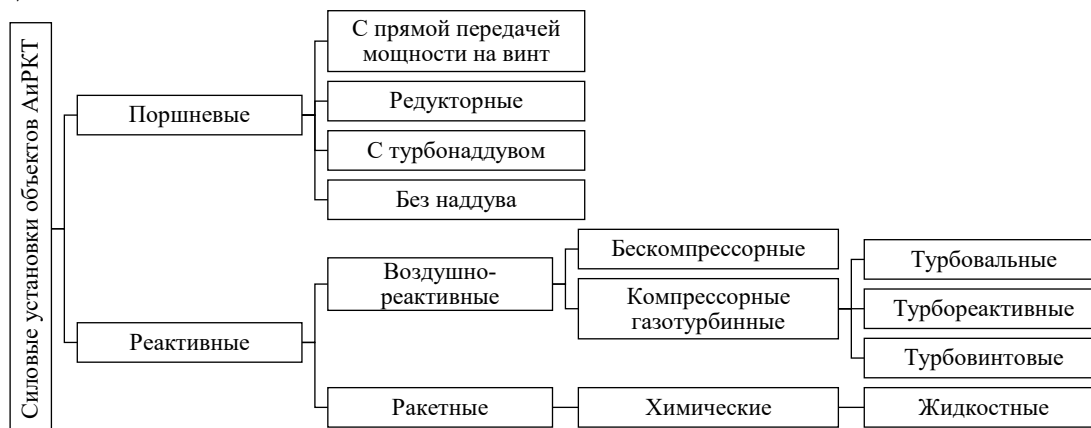


Рисунок 3 – Классификация СУ АиРКТ, элементы которых доступны для контроля ОВТД

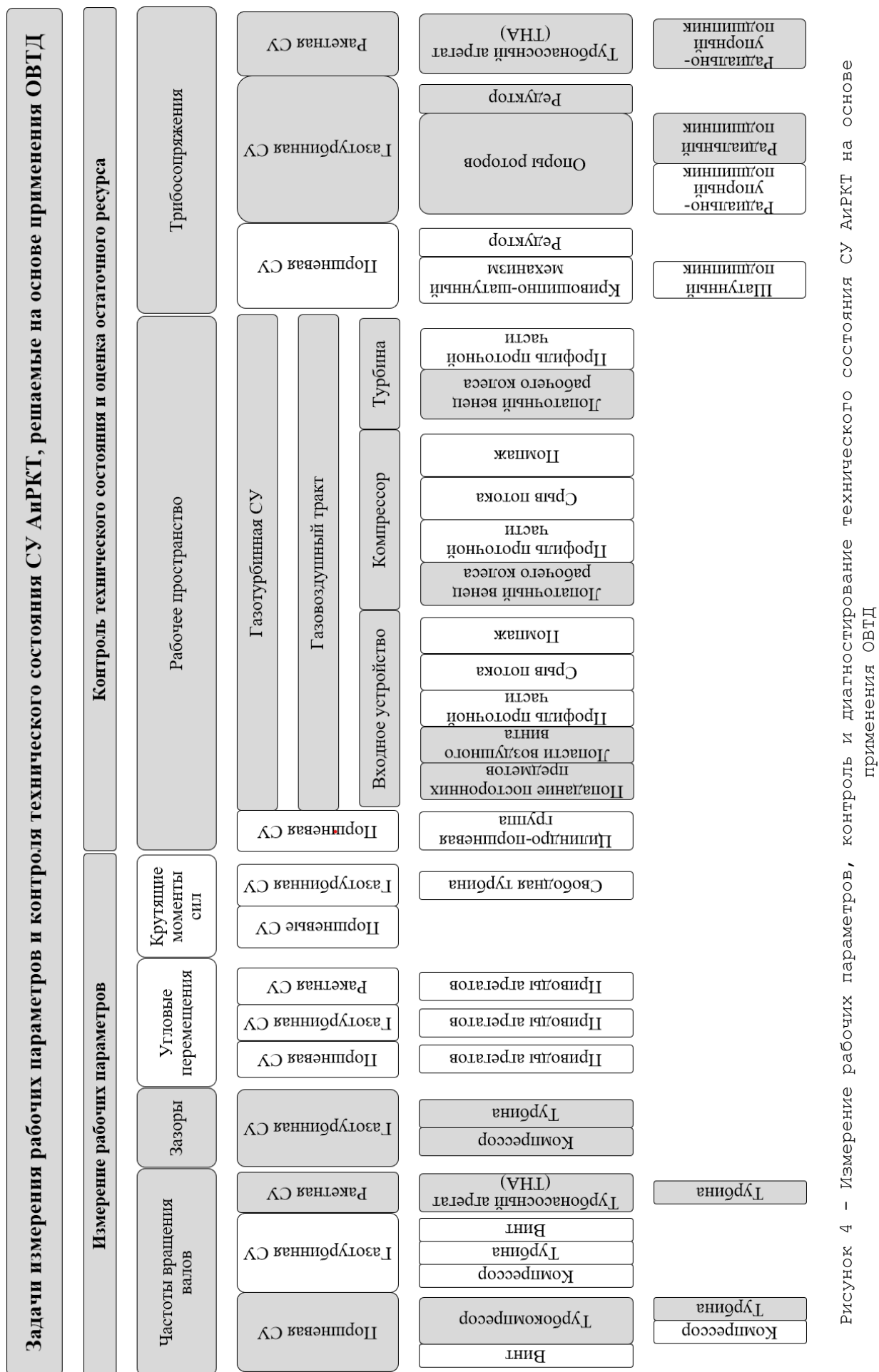


Рисунок 4 – Измерение рабочих параметров, контроль и диагностирование технического состояния СУ АИРКТ на основе применения ОВТД

В общем случае, все СУ АиРКТ можно разделить на поршневые и реактивные [20, 21]. Поршневые СУ с винтовым двигателем находят применение преимущественно в авиационной технике [21], в то время, как реактивные СУ используются в качестве двигательных установок как в изделиях авиационного, так и ракетно-космического назначения. В зависимости от способа передачи мощности на винт поршневые СУ могут быть разделены на СУ с прямой передачей мощности и редукторные. По способу наполнения цилиндров поршневые СУ делятся на двигатели без наддува и с турбо-наддувом. Среди реактивных СУ выделяют воздушно-реактивные, к числу которых относятся бескомпрессорные (прямоточные) и компрессорные газотурбинные двигатели (турбовальные, турбореактивные и турбовинтовые), и ракетные двигатели, которые на схеме рис. 3 представлены подклассом жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на химическом топливе.

Дальнейшая поэлементная декомпозиция СУ АиРКТ позволяет определить круг измерительных задач, которые могут быть решены с помощью систем на основе ОВТД. На рис. 4 такая классификация представлена в достаточно укрупненном виде, где отмечены наиболее востребованные задачи, актуальность которых подтверждается анализом доступных источников информации, в том числе, открытых публикаций о происшествиях, связанных с эксплуатацией изделий АиРКТ [22–24]. Например, одной из таких задач применительно к СУ АиРКТ является контроль технического состояния трибосопряжений авиационных и ракетных двигателей [5, 6], к которым относятся радиальные и радиально-упорные подшипники, а также редукторы, применяемые в различных узлах и агрегатах машин. В качестве диагностических параметров, доступных для контроля с помощью ОВТД, в данном случае выступают осевые перемещения валов в радиально-упорном подшипнике или наличие металлических частиц изнашивания в системах смазки подшипниковых узлов. В первом случае контроль осуществляется с помощью кластеров ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника (рис. 1, б) [5], обеспечивающих бесконтактное измерение осевого перемещения вала в условиях изменяющихся температур и радиальных зазоров между измерительным диском и корпусом изделия. Для обнаружения металлических частиц изнашивания в масле применяются ОВТД с ЧЭ в виде одиночного контура тока (рис. 1, а) [6], которые позволяют определить эквивалентный размер обнаруженных частиц и их магнитные свойства (ферромагнитная частица или нет).

Для воздушно-реактивных СУ авиационного применения, имеющих открытый вход в проточную часть, актуальной задачей является обнаружение попадания посторонних предметов в входное устройство двигателя (вентилятор) в процессе движения самолета по аэродрому (бетонная крошка, гравий, случайные предметы, обусловленные человеческим фактором и т.д.) или в полете (птицы, вулканический пепел и т.п.). Одним из способов решения данной задачи является выявление вибраций лопаток вентилятора при их соударении с твердым предметом. Обнаружить колебания рабочих лопаток и оценить параметры колебаний возможно на основе применения одиночных ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника (рис. 1, б) или их кластерных композиций [12], размещаемых особым образом на статоре контролируемой СУ и определяющих моменты появления торцов лопаток рабочего колеса относительно выбранной точки на внутренней поверхности статорной оболочки (т.н. ВТТ-технология (от англ. Blade Tip Timing – определение времени появления [лопатки]) [25]). При этом реализация ВТТ-измерений с помощью ОВТД с последующим временным анализом изменений изгиба пера лопатки потенциально позволяет обнаруживать дефекты, вызванные, например, усталостными изменениями свойств металла, из которого изготовлена лопатка.

В завершении раздела необходимо отметить, что помимо задач, непосредственно связанных с диагностированием технического состояния СУ АиРКТ, актуальными остаются задачи прямого измерения рабочих параметров авиационных и ракетных двигателей. В частности, как минимум в практике экспериментальных исследований поршневых и газотурбинных двигателей, применяемых в авиации, часто возникает потребность в прямых измерениях мгновенных скоростей вращения роторов различных узлов и агрегатов СУ. Также, не менее востребованными являются эксперименты, связанные с прямыми измерениями радиальных зазоров в компрессорах и турбинах ГТД, целью которых является контроль и недопущение опасных состояний СУ, а также проверка адекватности разработанных моделей функционирования элементов газо-воздушного тракта двигателя.

#### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОВТД

Несмотря широкий спектр задач, решаемых с помощью ОВТД, процесс получения и обработки измерительной информации в системах диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса объектов АиРКТ на основе применения ВТП данного класса во многом идентичен и в обобщенном виде может быть представлен функциональной схемой рис. 5.

Для рассматриваемого класса задач, контролируемые изделия, включая среду их функционирования, с самых общих позиций можно охарактеризовать кортежем  $\mathbf{P}$ , содержащим параметры, доступные для прямых измерений с помощью ОВТД ( $\mathbf{P}_M$ ), а также компоненты, описывающие внешнюю и внутреннюю среду ( $\mathbf{P}_E$ ) и режим работы ( $\mathbf{P}_{OM}$ ) объекта контроля:

$$\mathbf{P} = \langle \mathbf{P}_M, \mathbf{P}_E, \mathbf{P}_{OM} \rangle. \quad (1)$$

Информативный параметр  $i$ -того ОВТД – изменение его эквивалентной индуктивности  $L_{Mi}$ , в общем случае, зависит от пространственного положения объекта контроля (торца лопатки, частицы изнашивания и т.п.) в зоне чувствительности датчика (вектор  $\mathbf{K}_M$ ), его геометрических параметров (вектор формы  $\mathbf{P}_G$ ), физико-химических свойств материала объекта (вектор  $\mathbf{P}_{PH}$ ), а также параметров среды ( $\mathbf{P}_E$ ), оказывающей негативное (мешающее) воздействие на средства измерений [17]:

$$L_{Mi} = f(\mathbf{P}_M, \mathbf{P}_E); \mathbf{P}_M = \langle \mathbf{K}_M, \mathbf{P}_G, \mathbf{P}_{PH} \rangle. \quad (2)$$

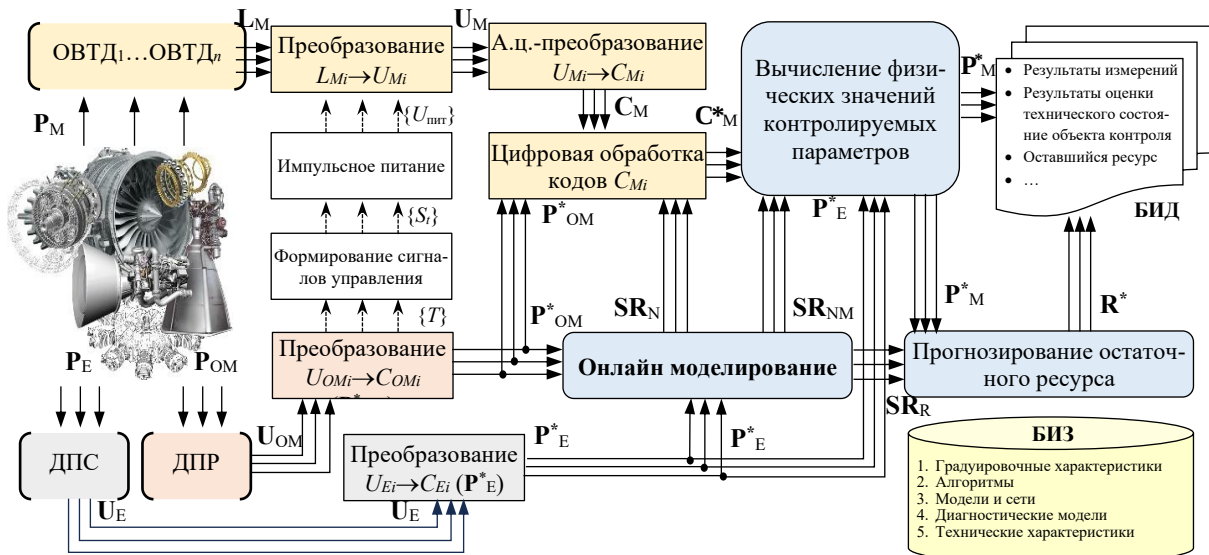


Рисунок 5 – Обобщенная функциональная схема систем диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса объектов АиРКТ на основе ОВТД

Изменения  $L_{Mi}$  преобразуется в импульсной ИЦ, реализующей метод первой производной [10], в напряжения  $U_{Mi}$ . При этом формирование импульсов питания ОВТД ( $U_{пит}$ ) может осуществляться как с постоянной частотой, максимально необходимой для получения требуемого числа замеров при максимальной скорости прохождения контролируемого объекта в зоне чувствительности датчика, так и вычисляться (сигналы управления  $S_t$ ) непосредственно в ходе измерений для текущих условий функционирования объекта контроля, например на основании результатов опроса датчиков частоты вращения (ДЧВ) роторов СУ (период вращения  $T$ ), которые относятся к датчикам параметров режима (ДПР, см. рис. 5) и зачастую являются штатным оборудованием в составе контрольно-измерительной аппаратуры СУ или стенда.

Выходные напряжения ИЦ с ОВТД ( $\mathbf{U}_M = \{U_{Mi}\}$ ) подвергаются аналого-цифровому преобразованию (коды  $\mathbf{C}_M$ ) и последующей цифровой обработке кодов, которая обычно сводится к распознаванию полезного сигнала на фоне действующих в измерительном канале шумов и помех. Традиционно для этих целей применяют различные фильтры – от простейших КИХ-фильтров «скользящее среднее», до сложных, учитывающих особенности функционирования объекта контроля ( $\mathbf{P}_{OM}^*$ ) или построенных на основе моделей шума ( $\mathbf{SR}_N$ ).

Собственно определение физических значений контролируемых с помощью ОВТД параметров технического состояния объектов АиРКТ, их узлов и агрегатов осуществляется путем совокупных измерений на основе экспериментально снятых в лабораторных условиях семейств градуировочных характеристик, связывающих коды  $\mathbf{C}_M^*$  с искомыми параметрами с учетом воздействующих на средства измерения и объект контроля влияющих факторов:

$$\begin{cases} C_{M,1}^* = f_1(k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi}, p_{G,1}, p_{G,2}, \dots, p_{G,\psi}, p_{PH,1}, p_{PH,2}, \dots, p_{PH,\zeta}, \mathbf{P}_E^*) \\ C_{M,2}^* = f_2(k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi}, p_{G,1}, p_{G,2}, \dots, p_{G,\psi}, p_{PH,1}, p_{PH,2}, \dots, p_{PH,\zeta}, \mathbf{P}_E^*), \\ \dots \\ C_{M,n}^* = f_n(k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi}, p_{G,1}, p_{G,2}, \dots, p_{G,\psi}, p_{PH,1}, p_{PH,2}, \dots, p_{PH,\zeta}, \mathbf{P}_E^*) \end{cases} \quad (3)$$

где  $n \geq 1$  – число ОВТД, необходимых для контроля заданного параметра состояния объекта АиРКТ (число ОВТД в составе кластера датчиков);  $k_{M,i} \in \mathbf{K}_M, i = \overline{1.. \chi}$  – контролируемые координаты перемещения объекта в зоне чувствительности ОВТД;

$p_{G,j} \in P_G, j = \overline{1..}\psi$  – контролируемые параметры формы (размеры) объекта;  $p_{PH,l} \in P_{PH}, l = \overline{1..}\zeta$  – контролируемые свойства материалов объекта;  $P_E^*$  – параметры внешней и внутренней среды объекта (прежде всего, температура в зоне измерения), являющиеся мешающими факторами и оказывающими негативное влияние на результат преобразования контролируемых параметров. Информация о  $P_E^*$  в виде цифровых кодов  $C_{E,i}$  или непосредственно вычисленных физических значений обычно поступает в систему измерения от внешних или встроенных в ОВТД датчиков параметров среды (ДПС), например, термопар [4, 10], и служит для алгоритмической коррекции результатов преобразования контролируемых параметров.

Как уже отмечалось, в соответствии с кластерными методами измерения на основе ОВТД [12, 13], число датчиков в кластере, должно соответствовать общему числу параметров, как измеряемых, так и оказывающих влияние на выходной сигнал ОВТД, т.е.:

$$n = \chi + \psi + \zeta. \quad (4)$$

Однако в реальных условиях обеспечить размещение требуемого количества ОВТД в зоне измерения далеко не всегда представляется возможным, прежде всего, в силу конструкционных или технологических ограничений объекта контроля. Поэтому нередко ситуации, когда условие (4) не выполняется и система уравнений (3) становится неполной. В этом случае систему (3) дополняют рассчитанными для текущих параметров внешней и внутренней среды объекта ( $P_E^*$ ) неизмеряемыми составляющими ( $SR_{NM}$ ), реализуя тем самым методы измерения с помощью неполного кластера ОВТД [12].

Вычисление неизмеряемых параметров осуществляется в блоке онлайн моделирования. Исходными данными для моделей являются векторы параметров режима ( $P_{OM}^*$ ) и среды ( $P_E^*$ ) объекта. Набор моделей определяется задачами контроля и может меняться от эксперимента к эксперименту, но неперенным условием является то, что расчеты должны осуществляться в реальном времени для текущих условий функционирования объекта и состояния окружающей среды. Также следует учитывать, что ресурсы вычислителей в составе бортовых и стендовых систем измерения существенно уступают полнофункциональным САЕ-системам, применяемым, например, для моделирования рабочих процессов в ГТД [26]. Поэтому модели должны обладать высоким быстродействием и не предъявлять завышенных требований к ресурсам вычислителя (объемам оперативной памяти, процессорному времени и т.п.). Решение указанных задач возможно на основе моделей, построенных на новых принципах (например, нечетких логических [27] или нейросетевых моделей), которые несмотря на упрощения, обеспечивают генерирование правдоподобных результатов.

Еще одним направлением применения моделей в процессе измерения и контроля параметров состояния изделий АиРКТ является оценка остаточного ресурса ( $R^*$ ) узлов и агрегатов на основе текущей измерительной информации об условиях эксплуатации узла и модели его разрушения. Если результаты измерения ( $P_M^*$ ) не превышают значений, полученных расчетным путем ( $SR_R$ ), то на основе модельных данных рассчитывается остаточный ресурс узла. При существенном расхождении результатов моделирования и измерений, система переходит в режим прогнозирования «критического» времени до аварийного разрушения узла на основе экспертных оценок.

Результаты измерения параметров состояния объектов АиРКТ, включая результат оценки остаточного ресурса узлов и агрегатов изделий формирует базу измерительных данных (БИД). Помимо БИД на рис. 5 представлена и база измерительных знаний (БИЗ), которая содержит декларативные (фактические) знания об объекте контроля (технические характеристики) и средствах измерения (градуировочные характеристики), а также процедурные знания в виде моделей и алгоритмов обработки сигналов и данных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная классификация объектов АиРКТ и анализ их элементов, доступных для контроля с помощью ОВТД, позволяет не только систематизировать существующие разработки в данной области, но и определить достаточно широкий круг новых задач технической диагностики, которые можно решить с помощью рассматриваемых в статье технических средств. Специфика задач контроля состояния изделий АиРКТ с помощью ОВТД, состоит в том, что получение измерительной информации зачастую сопровождается сложной информационной ситуацией, связанной с влиянием на результат преобразования факторов режима и среды функционирования объекта контроля, которые далеко не всегда доступны непосредственному наблюдению и учету. Поэтому наибольшего эффекта можно достичь при совместном использовании систем на основе ОВТД с другими техническими средствами диагностирования изделий АиРКТ, построенных на основе различных физических принципов. Включение в процесс измерения моделей поведения объекта и средств измерения, которые в той или иной мере отражают

наши знания и представления о процессах, происходящих в объектах и средствах контроля, позволяет не только снизить неопределенность знаний о влияющих факторах, но и дает возможность определить опасные состояния и оценить остаточный ресурс контролируемых узлов, обеспечивая тем самым переход от регламентного обслуживания образцов сложной техники к их обслуживанию по фактическому состоянию. При этом развитие современной электроники и микропроцессорной техники снимает многие ограничения, связанные с быстродействием и сложностью применяемых в системах моделей, что определяет дальнейшие пути развития представленного в статье подхода.

Работа выполнена сотрудниками лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН в рамках государственного задания Минобрнауки России для СамНЦ РАН №FMRW-2026-0004.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Przysowa, E. Rokicki, Inductive Sensors for Blade Tip-Timing in Gas Turbines, Journal of Konbin, Vol. 36, Issue 4, 2015, pp. 147-164. <https://doi.org/10.1515/jok-2015-0064>.
2. V. Sridhar, K. Chana, M. Pekris, High temperature eddy current sensor system for turbine blade tip clearance measurements, in Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics (ETC12), Stockholm, Sweden, 3-7 April 2017. <https://doi.org/10.29008/ETC2017-217>
3. Z. Zhao, Z. Liu, Y. Lyu, Y. Gao, Experimental Investigation of High Temperature-Resistant Inductive Sensor for Blade Tip Clearance Measurement, Sensors, Vol. 19, Issue 1: 61, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19010061>.
4. S. Borovik, Y. Sekisov, Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines, Sensors, Vol. 20, Issue 7, 2020, p. 2107. <https://doi.org/10.3390/s20072107>.
5. V. Belosludtsev, S. Borovik, V. Danilchenko, Y. Sekisov Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors. Sensors, Volume 21. Issue 10, 2021, p. 3463. <https://doi.org/10.3390/s21103463>
6. Belopukhov, V.; Blinov, A.; Borovik, S.; Luchsheva, M.; Muhutdinov, F.; Podlipnov, P.; Sazhenkov, A.; Sekisov, Y. Monitoring Metal Wear Particles of Friction Pairs in the Oil Systems of Gas Turbine Power Plants. Energies 2022, 15, 4896. <https://doi.org/10.3390/en15134896>
7. Райков В.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Хритин А.А. Вихретоковые датчики зазоров с чувствительными элементами в виде отрезка проводника // Приборы и системы управления, – 1996. – №8. – С.27-30.
8. Кутейникова М.М., Райков В.К., Скобелев О.П. Конструктивные разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV межд. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2012. –с.595-601.
9. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н. Одновитковые вихретоковые преобразователи для измерения механических параметров // Вестник СГАУ. –2013. –№4 (42). –С.94-102
10. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors. In Sensors, Measurements and Networks, Book Series: Advances in Sensors, Vol. 8 / ed. S. Y. Yurish. Barcelona: IFSA Publishing, S. L., 2022. 19-48 p.
11. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Беленький Л.Б. [и др.]; под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188с.
12. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, В.К. Райков [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Машиностроение, 2011. – 298с.
13. Кластерные методы и средства измерения радиальных зазоров в проточной части турбины / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. –224 с.
14. Методы и средства измерения и обработки информации о радиальных зазорах в проточной части ГТД с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – Самара: Изд. «Новая техника», 2021. – 142 с.
15. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипнов П.Е., Секисов Ю.Н., Блинов А.В., Годдобин Е.А. Контроль технического состояния узлов и агрегатов силовых установок большой мощности на основе одновитковых вихретоковых датчиков // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 8. – С. 49-54. – DOI 10.25728/avtпром.2024.08.10.
16. Марочник сталей и сплавов. 7-е изд., стереотипное / Ю.Г. Драгунов, М28 А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М.: Инновационное машиностроение, 2021. –1216 с.
17. Borovik, S.; Kuteynikova, M.; Sekisov, Y. Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. 2023. №23. p.351.
18. Перечень изделий РКТ. <https://www.roskosmos.ru/34744/>
19. Методические рекомендации по организации и проведению в федеральном агентстве воздушного транспорта подтверждения соответствия юридических лиц, осуществляющих разработку воздушных судов и другой авиационной техники установленным требованиям. –2017 г. – 19 с. <https://favt.gov.ru/public/materials/c/a/b/2/c/cab2c5fa6cd94883a385e7ef5f33fc5a.pdf>.
20. Москаленко Л.В., Стреляев Д.В., Чичков В.А., Тимонин А.Л. Основы теории и конструкции авиационных двигателей: учебное пособие. –М.: МГТУ ГА, 2015. –64 с.
21. Моисеев В.С. Силовые установки перспективных беспилотных вертолетов. –Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2020. – 284 с.
22. NASA Independent Review Team Orb-3 Accident Investigation Report. Executive Summary // National Aeronautics and Space Administration: сайт. – URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3\\_irt\\_execsumm\\_0.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf).
23. Дмитриев С. А., Симонова Е. С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007-2020 гг// НикСС. 2023. №1 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-otkazov-i-povrezhdeniy-aviatsionnyh-dvigatelye-za-period-2007-2020-gg> (дата обращения: 10.04.2026).

УДК 618.1

**Леонов<sup>1</sup> А.С., Горячев<sup>2</sup> Н.В., Кочегаров<sup>3</sup> И.И.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Аннотация.** Исследуются актуальность применения современных композитных материалов и полимерных нанокомпозитов при проектировании и изготовлении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Проводится анализ свойств используемых материалов, а также выявляются уникальные характеристики композитов, способствующие оптимизации характеристик БПЛА. Кроме того, рассматриваются перспективы интеграции нанокомпозитов в данную отрасль.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, композитные материалы, нанокомпозиты, матрица, наполнитель

**Leonov<sup>1</sup> A.S., Goryachev<sup>2</sup> N.V., Kochegarov<sup>3</sup> I.I.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

## **APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN THE DESIGN AND MANUFACTURE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

**Abstract.** The article explores the relevance of using modern composite materials and polymer nanocomposites in the design and manufacturing of unmanned aerial vehicles (UAVs). It analyzes the properties of the materials used and identifies the unique characteristics of the composites that can be used to optimize the performance of UAVs. Additionally, the article discusses the potential for integrating nanocomposites into this industry.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, composite materials, nanocomposites, matrix, filler

### **Введение**

Стремительный прогресс в области беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) диктует необходимость внедрения инновационных технологий. Одним из ключевых векторов развития БПЛА является повышение уровня их надежности, автономности, боеспособности, оптимизация физико-механических свойств, экономической эффективности посредством снижения массы конструкции. Достижение указанных целей возможно за счет применения инновационных композиционных материалов, демонстрирующих превосходство над традиционными материалами по ряду эксплуатационных характеристик.

В процессе создания БПЛА используются различные виды материалов, обеспечивающие оптимальное сочетание легкости, прочности и аэродинамических свойств. В рамках данной статьи рассматриваются ключевые материалы, находящие применение в конструировании БПЛА, с особым акцентом на возрастающую значимость композитных материалов и перспективы их дальнейшего развития.

Материалы, применяемые в производстве беспилотных летательных аппаратов, играют важную роль в определении их характеристик и качества. Уникальные свойства каждого материала влияют на общие характеристики БПЛА.

### **Пластик**

Некоторые части беспилотных летательных аппаратов, такие как корпуса и соединители, могут быть сделаны из разных видов пластиков, таких как полиуретан, полиэтилен, полипропилен, АБС-пластик и другие. Пластик обеспечивает легкость и гибкость, что важно для полетных характеристик, и может быть формован в различные формы.

Изделия из этих материалов легкие, легко формуются и дешевы, однако их прочность невысока.

### **Алюминий**

Алюминий и его сплавы применяются для создания легких и прочных структурных элементов, особенно в авиационной промышленности. Этот металл обладает высокой прочностью, долговечностью и хорошей теплопроводностью, что делает его идеальным для надежных конструкций, способных выдерживать сильные нагрузки. Кроме того, алюминий имеет хорошую коррозионную стойкость и легко поддается обработке и формовке.

### **Титан**

Титановые сплавы применяются для создания фюзеляжа БПЛА, что позволяет значительно уменьшить вес и повысить эффективность полета. Например, конструкция фюзеляжа из титанового сплава делает один тип БПЛА на 30% легче и на 20% эффективнее в полете, чем при использовании традиционных материалов.

Пропеллеры из титанового сплава обладают легким весом, высокой прочностью и устойчивостью к коррозии, что способно улучшить характеристики БПЛА. Например, использование таких пропеллеров может сделать БПЛА на 20% легче, а также улучшить его устойчивость и управляемость в полете.

Высокая цена сырья, долгий процесс обработки и высокое потребление энергии делают производство некоторых комплектующих для БПЛА дорогим.

Композиционные материалы

Спрос на новые материалы, включая композиты, растет из-за увеличения маневренности и уменьшения размеров БПЛА. Применение указанных материалов способствует формированию конструктивных элементов с повышенной прочностью и пониженной массой, что приводит к оптимизации эксплуатационных характеристик аппарата.

Композиционные материалы дают возможность гибко управлять их свойствами, что приводит к созданию материалов с уникальными эксплуатационными качествами. В высокотехнологичных сферах активно применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ), среди которых выделяются стекло- и углепластики. Их впечатляющая прочность достигается за счет использования непрерывных волокон в качестве армирующего компонента.

Композитные материалы – это соединение различных компонентов, которые вместе образуют уникальные свойства, недостижимые по отдельности. Композиты состоят из матрицы и наполнителя, которые могут быть различными по своему составу и свойствам. Матрица защищает наполнитель, обеспечивает передачу нагрузок и определяет технологические характеристики материала. Например, полимерные матрицы обладают низкой плотностью и хорошей изоляцией, а металлические – высокой теплопроводностью и пластичностью.

Армирующая функция возложена на наполнитель, который может быть представлен в различных формах: волокна, дискретные частицы, слоистые структуры или нитевидные кристаллы. Высокая устойчивость к растягивающим нагрузкам характерна для стеклянных и углеродных волокон. Введение керамических частиц обеспечивает повышенную термостойкость и твердость материала. Объемная доля наполнителя колеблется в диапазоне от 20 % до 80 %, что определяется как типом композитного материала, так и необходимыми конечными характеристиками.

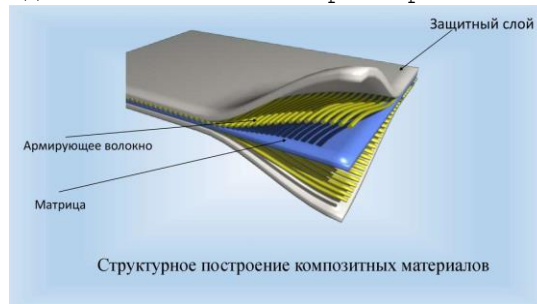


Рисунок 1 – Особенности композитных материалов

Свойства композитных материалов можно направленно регулировать, подбирая составляющие компоненты, что позволяет получать материалы с нужными характеристиками. Это делает их популярными в проектировании и производстве БПЛА.

Углеродное волокно (карбон) – является популярным материалом для производства беспилотных летательных аппаратов. Этот материал отличается своей прочностью, превосходящей прочность стали, при меньшем весе, чем у алюминия. Углепластик, созданный из углеродного волокна и полимерного связующего, представляет собой новый класс полимерного композита с уникальными свойствами. Его широко используют в производстве БПЛА благодаря сочетанию высокой прочности и низкого веса. Материал состоит из углеродного волокна и полимерного связующего, собранных в кристаллы с параллельными линиями шириной от 5 до 15 микрон. Это придает углепластику исключительную прочность и жесткость.



Рисунок 2 – Углеродное волокно



Производство углеродного волокна состоит из нескольких сложных этапов.

Этапы производства углеволокна

Для создания материала используется вискозное или полиакрилонитрильное волокно. Чтобы избежать примесей и получить чистые волокна, состоящие преимущественно из углерода, проводится сложная термическая обработка в несколько этапов.

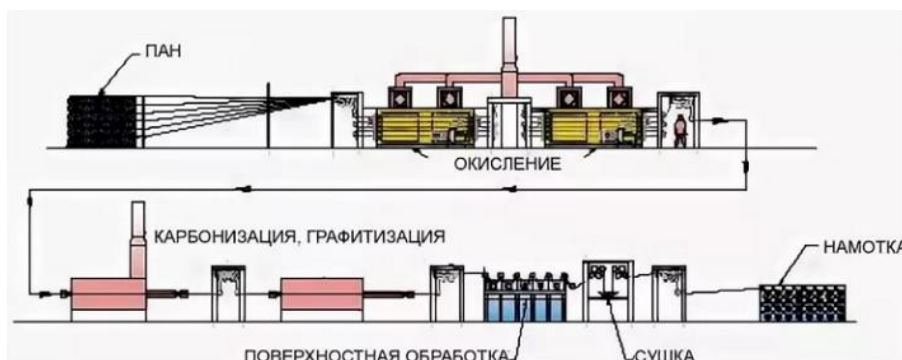


Рисунок 3 – Производство углеродного волокна

- для создания лестничных структур необходимо окислить исходное волокно на воздухе при оптимальной температуре 250 градусов Цельсия. Процесс обработки занимает до суток;

- путем карбонизации при высоких температурах в атмосфере азота или аргона образуются структуры, схожие с графитом, с содержанием углерода около 92%;

- главная цель графитизации – увеличить содержание углерода в структурах до 99%. Этот процесс происходит при очень высоких температурах в инертных средах.

Механические характеристики

Таблица 1

| Свойство                | Показатель                       | Сравнение                                          |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|
| Прочность на растяжение | 2500-7000 МПа                    | В 5 раз прочнее стали                              |
| Модуль упругости        | 210-800 ГПа                      | Превосходит алюминий в 3 раза                      |
| Плотность               | 1,7-1,9 г/см <sup>3</sup>        | В 4 раза легче стали                               |
| Удельная прочность      | До 3700 МПа/(г/см <sup>3</sup> ) | Лучший показатель среди конструкционных материалов |

Из углеродного волокна производят широкий спектр изделий, включая стержни (круглые и квадратные), трубки (круглые, квадратные с круглым или квадратным внутренним сечением), а также цветные трубки в рулонах.

Углеродное волокно обладает уникальными свойствами: оно в четыре раза легче стали и в два раза легче алюминия, при этом значительно прочнее этих металлов. Эта легкость и прочность критически важны для изготовления рам беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), поскольку позволяют снизить вес конструкции и повысить эффективность полета. Оно характеризуется высокой прочностью на растяжение, превышающей 3500 МПа, и исключительной жесткостью. Эти качества обеспечивают отличную устойчивость к вибрациям и ударам, возникающим во время полета, что гарантирует надежную поддержку конструкции БПЛА.

Материал отличается высокой степенью защиты от коррозии и неблагоприятных внешних воздействий, что гарантирует его долговечность и надежность в условиях повышенной влажности.

Стабильность размеров и характеристик материала даже при резких перепадах температуры обеспечивается его низким коэффициентом теплового расширения, что делает его незаменимым для точных измерений и ответственных задач.

Арамиды

Эти химические волокна обладают высокой функциональностью благодаря своей структуре с жесткими полимерными цепочками. Сильные водородные связи между молекулами обеспечивают эффективную передачу механических нагрузок, даже при относительно небольшой молекулярной массе цепочек.

Арамид – это общее название для класса синтетических волокон, известных как "Ароматические Полиамиды". Их отличительная черта – особая молекулярная структура: длинные полиамидные цепочки, в которых не менее 85% амидных связей непосредственно соединены с ароматическими кольцами. Это структурное преимущество придает арамиду высокую плотность, термостойкость и упругость. К тому же, он хорошо сопротивляется химическим воздействиям. Кроме того, он обладает хорошей устойчивостью к различным химическим воздействиям. Эти характеристики делают его ценным компонентом для создания высокопрочных тканей в составе композитных материалов.

Производство арамидных тканей включает в себя использование различных химических веществ и композитных добавок. Варьируя состав и плотность волокон (от 130 до 10 000 тыс. ), можно получать материалы с разными свойствами. Технологии полотняного, саржевого и сатинового плетения используются для создания структуры ткани из этих волокон

Существует три группы арамидных материалов, которые различаются по структуре волокон:

- параарамиды (п-арамиды). Данные материалы производят торговые марки СВМ, терлон, тварон, кевлар. В основе парафенилендиамин и терефталойлхлорид;
- метаарамиды (м-арамиды) – Номекс и арселон. В их составе преобладает метафенилендиамин, дихлорангидрид изофталевой кислоты.
- сополимеры – торговая марка Кармель. В основе полиамид-имид м-арамидов.

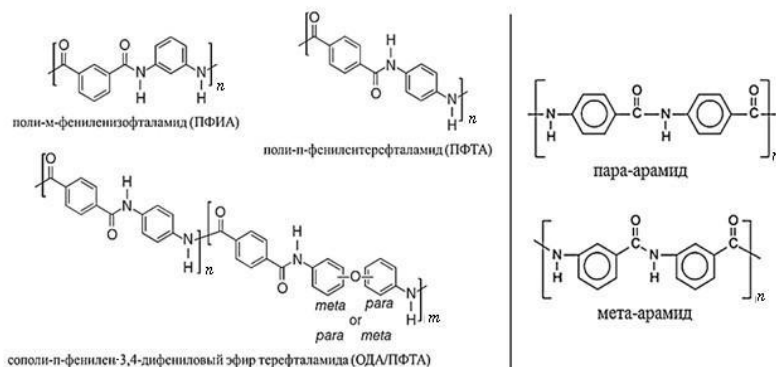


Рисунок 4 – Формулы ароматических полиамидных полимеров

#### Получение арамидных волокон

Высокая прочность связей между молекулами в ароматических полиамидах приводит к высоким температурам переходов. Это, в свою очередь, делает их переработку в расплавленном состоянии крайне затруднительной, а зачастую и невозможной. Следовательно, для получения волокон из этих материалов применяют метод формования из растворов.

Рассмотрим основные этапы процесса производства арамидного волокна.

- 1) Синтез волокнообразующего полимера;
- 2) Формование нитей из поликондиционных растворов;
- 3) Термообработка и термовытяжка нитей.

Синтез арамидных полимеров, способных образовывать волокна, осуществляется посредством поликонденсации в растворе при пониженной температуре (5-10 °С). Реагенты вводятся в раствор при интенсивном перемешивании, инициируя образование полимера. Затем полимер выделяется из реакционной смеси в виде гелеобразного вещества или мелких частиц, после чего следует стадия промывки и сушки.

Свойства арамидных волокон

Таблица 2

| Арамидные нити                      | Удельная разрывная нагрузка нити, сн/текс | Прочность нити в микропластике, кг/мм <sup>2</sup> | Модуль упругости статич., ГПа | Удлинение нити при разрыве, % не менее | Кислотность водной вытяжки |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| Русар НТ* (НИР «Мономер-1»)         | от 250                                    | 550-650                                            | 175-195                       | 1,5-2,0                                | Нейтральная                |
| Русар-С (ООО «Термотекс»)           | от 260                                    | 550-650                                            | 165-175                       | 2,0-3,0                                | Кислая                     |
| Русар (ОАО «Каменскволокно»)        |                                           | 480-520                                            | 150-155                       | 2,0-3,0                                | Кислая                     |
| Русар нейтр. (ОАО «Каменскволокно») |                                           | 440-480                                            | 125 -135                      | 2,0-3,0                                | Нейтральная                |
| Кевлар (США) *                      | до 220                                    | 380-400                                            | 150-160                       | 1,5-2,0                                | Нейтральная                |

Для получения волокон, полученный полимер сначала растворяют в сильной кислоте, такой как концентрированная серная. Затем этот раствор пропускают через фильеры при температуре 50-100 °С, формируя волокна и нити методом экструзии. После экструзии волокна проходят короткий воздушный зазор (5-20 мм) и охлаждаются в ледяной воде (ниже 4 °С). Далее волокна промывают, собирают и сушат. Свойства конечного продукта можно регулировать, изменяя растворитель, условия

формования или подвергая свежесформованные волокна термической обработке. Эти волокна обладают исключительной прочностью на разрыв, жесткостью и термостойкостью. Они химически инертны, негорючи и устойчивы к истиранию.

Арамидные волокна используются при изготовлении различных элементов БПЛА, таких как:

- корпуса и рамы арамидные волокна делают дроны прочными и устойчивыми к ударам;

- конструкционные элементы например, лист с многослойной сотовой структурой, изготовленный из арамидной ткани, покрытой эпоксидной смолой, имеет высокую ударопрочность и защищает от электромагнитных волн;

- обшивка панелей позволяет обеспечивает прочность и легкость конструкции;

Стекловолокно

Среди распространенных композитных материалов выделяется стекловолокно, отличается хорошей прочностью и жесткостью, Оно отличается хорошей прочностью и жесткостью, но уступая в этом углеродному волокну. Тем не менее, его более низкая стоимость и простота обработки делают стекловолокно востребованным для многих задач.

Стекловолокно (также известное как стеклонить) – это нити, изготовленные из стекла. В таком виде стекло демонстрирует необычные для себя характеристики: оно становится гибким и устойчивым к разрывам, что открывает возможности для его использования в ткачестве, создавая стеклоткань.



Рисунок 5 – Образцы стекловолокна и наполнители для композитных материалов

Стекловолокно производится из нитей толщиной от 3 до 100 мкм и длиной до 20 км и более Стекловолокно производится из стекла (алюмоборосиликатного) или стеклобоя, что позволяет сократить затраты на производство.

Технология изготовления нитей:

- путем расплавления стекла получают пластичную массу;
- с помощью экструзии удастся сформировать нити минимальной толщины;
- форма стекловолокна определяется тем, как расплавленное стекло проходит через отверстия фильер.

Производственный процесс включает создание от 200 до 4000 тончайших, но не-ломких нитей из стекловолокна. Диаметр этих нитей может варьироваться. Готовые нити автоматически наматываются на бобины в процессе изготовления

При выборе материалов для беспилотников существует различие: для критически важных, высоконагруженных деталей военных аппаратов выбирают дорогой углепластик. Однако для менее требовательных гражданских и исследовательских задач вполне достаточно более доступного стеклопластика. При этом стеклопластики не уступают в своих эксплуатационных качествах: они прочны, гибки, жестки и устойчивы к химическим воздействиям. К тому же, они хорошо поглощают вибрации, пропускают радиоволны, а также являются тепло- и электроизоляторами. В сочетании с низкой плотностью (в четыре раза меньше стали) эти свойства делают стеклопластик универсальным выбором. Учитывая, что они в четыре раза легче стали, эти характеристики делают стеклопластик универсальным материалом для широкого спектра применений.

Примером является производство лопастей винтов, стеклопластик демонстрирует превосходство по показателям ресурса и усталостной выносливости относительно металлических аналогов. Данное свойство приобретает особую значимость при эксплуатации в условиях динамически изменяющихся нагрузок.

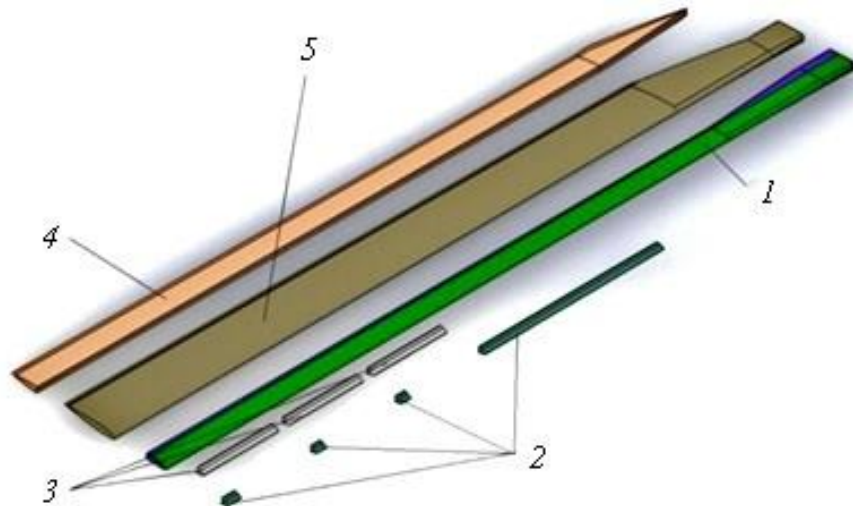


Рисунок 6 – Конструкция лопасти из стеклопластика для БПЛА вертолетного типа:  
1 – лонжерон; 2 – наполнитель носка; 3 – свинцовые противофлаттерные грузы; 4 – наполнитель хвостика; 5 – обшивка

Обладая высокой устойчивостью к вибрациям, стекловолокно пропускает радиоволны и эффективно изолирует тепло и электричество. В производстве радиопрозрачных обтекателей антенн и крышек люков находит применение данный материал. Он выполняет двойную функцию: защищает находящееся внутри оборудование от неблагоприятных внешних условий и одновременно препятствует возникновению помех, вызванных электромагнитными волнами.

Полимерные композиты:

Полимерные композиты – это собирательный термин для материалов, состоящих из пластиковой матрицы и армирующих наполнителей. Матрица обеспечивает структурную целостность, а наполнители формируют необходимые физические параметры. Преимущество этих композиционных материалов заключается в том, что они не только сравнимы по свойствам с традиционными аналогами, но и часто превосходят их, при этом будучи значительно легче.

Полимерная матрица в ПКМ может быть представлена как чистым полимером, так и его модифицированными вариантами. Матрица в ПКМ может состоять из чистого полимера или из полимера с добавками, которые улучшают эксплуатационные свойства изделий. Для придания полимеру специфических свойств, таких как цвет, гибкость, устойчивость к УФ-излучению и агрессивным средам, а также для снижения хрупкости, в него вводятся красители, пластификаторы и стабилизаторы. Эти компоненты также способствуют более легкому смешиванию всех составляющих.

Наполнитель в полимере может быть пропитан, нанесен порошком или использован в сложных конструкциях. Существуют армированные и дисперсно-наполненные композиты. Армированные могут быть волокнистыми или листовыми. Содержание наполнителя в материале может варьироваться от 0 до 98%. Материалы могут быть низко-, высоко- или предельно-наполненными. Гибридные композиты могут содержать разные виды наполнителей для создания разнообразных свойств. полимерные материалы с уникальными наборами свойств.

Существуют три основных способа создания полимерных композитов:

- жидкофазный метод включает использование жидкой полимерной смолы для пропитки армирующих волокон или ткани;
- метод твердофазного формирования включает в себя процессы прокатки,ковки и штамповки для создания изделий из твердого материала, таких как порошок или листы;
- при способе осаждения-напыления полимерное покрытие наносится на волокна, после чего композит затвердевает, образуя окончательную структуру ПКМ.

Виды полимерных композитов:

- стеклопластик – материал, усиленный стекловолокном, обладает высокой прочностью и жесткостью, не горит, прочнее стальной проволоки и выдерживает высокие температуры;
- металлопластики – это многослойные материалы, сочетающие металлическую основу с полимерным покрытием, который выполняет защитную функцию, предотвращая коррозию металла, а также придает изделию желаемый цвет и текстуру;
- органопластики – материалы, усиленные органическими веществами, которые обладают высокой прочностью при небольшом весе, превосходящей сталь;

- углепластики – материалы с углеродными волокнами, изготовленные специальной технологией. Они очень прочные, стойкие к высоким температурам и агрессивной среде. Однако их производство затратно из-за сложного процесса нагрева веществ до 3 000 °С;

- реактопласты – это полимеры, отверждающиеся при высокой температуре и образующие прочное вещество с постоянной структурой. В состав таких материалов часто входят различные добавки, основой часто служат феноло-формальдегидные и эпоксидные смолы;

Термореактивные связующие позволяют получать композиты с выдающейся прочностью и термостойкостью, обеспечивая наилучшие эксплуатационные свойства. Минусом является невозможность их простой рециркуляции или биоразложения.

Уникальные свойства полимерных композитов делают их чрезвычайно востребованными при создании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Рассмотрим ключевые преимущества их применения в этой области:

- обеспечивают высокую прочность при небольшом весе, что позволяет создавать легкие и прочные конструкции беспилотных летательных аппаратов.

- обладают высокой коррозионной стойкостью, что делает их пригодными для эксплуатации в суровых климатических условиях и в условиях повышенной влажности;

- сложная геометрия, которую можно придать БПЛА с помощью полимерных композитов, способствует оптимизации их аэродинамических свойств. В результате повышается эффективность летательных аппаратов и уменьшается сила сопротивления воздуха;

- благодаря технологической простоте и низкой стоимости процессов производства и формовки, полимерные композиты позволяют существенно удешевить изготовление комплектующих для БПЛА;

- полимерные композиты могут быть разработаны для специальных задач, например, для обеспечения электро- или теплопроводности в антеннах и системах терморегулирования.

Благодаря своей адаптивности Полимерные композиты могут использоваться как в краткосрочных, так и в долгосрочных условиях эксплуатации, адаптируясь под различные задачи

Хотя композиты не всегда лидируют по отдельным показателям, они выгодно выделяются сбалансированным набором характеристик. Путем подбора составляющих можно точно настроить такие свойства, как термостойкость, устойчивость к деформациям и ударам, а также электро- и теплопроводность. Это открывает возможности для создания материалов, идеально соответствующих специфическим потребностям конкретных применений и обладающих заданными параметрами.

Полимерные нанокompозитные материалы

Проанализировав потребности, постоянно возникающие в современном мире, в передовых материалах для удовлетворения современных технологических потребностей видна необходимость в разработке материалов нового поколения путем объединения интеллекта с инженерными методами.

В данном контексте вижу большую перспективу в разработке нанокompозитных материалов.

Наночастицы могут иметь разные свойства, которые отличаются от свойств объемных материалов. В составе композитов они способны повышать прочность, термостойкость, электропроводность и барьерные функции. Их добавляют к полимерной матрице, используя различные процессы, такие как кристаллизация, пластическая деформация и фазовые действующие на наноровне.

Ярким примером может служить материалы на основе углеродных нанотрубок. Ниже приведено сравнение углеродного волокна, свойства которого рассматривалось ранее, и материалов на основе углеродных трубок. Сравнение их свойств с углеродным волокном показывает новые перспективы и возможности для развития.

Углеродное волокно состоит из тонких нитей углерода, объединенных в гексагональную структуру. Эти нити обычно скручиваются вместе, чтобы сформировать более толстое волокно, которое затем используется в композитах.

Материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ)

Структура Углеродные нанотрубки (УНТ) – это цилиндрические структуры, состоящие из свернутых листов графена, образованные из одного или нескольких слоев графена, свернутых в трубки. Формирование нанотрубки, обозначаемой как  $(n, m)$ , требуется разрезать графеновую плоскость по определенным пунктирным линиям и затем свернуть полученную ленту вдоль заданного вектора  $R$ .

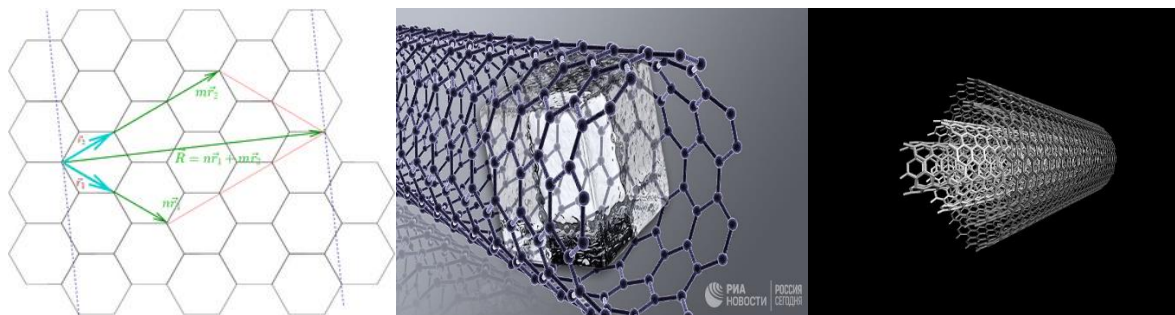


Рисунок 7 – Структура нанотрубки

Диаметр нанотрубки рассчитывается по диаметру цилиндра, длина окружности которого равна длине вектора  $R$  и выражается через индексы хиральности ( $n$ ,  $m$ ) как:

$$D = \frac{\sqrt{3}d_0}{\pi} \cdot \sqrt{n^2 + m^2 + nm},$$

где  $d_0$  расстояние между атомами углерода в графитовой плоскости составляет 0,142 нм.

Другой способ обозначения хиральности необходимо указать угол  $\alpha$  между направлением сворачивания нанотрубки и направлением соседних шестиугольников, чтобы описать геометрию нанотрубки, также необходимо указать её диаметр.

Связь между индексами хиральности ( $n$ ,  $m$ ) и углом  $\alpha$  даётся соотношением:

$$\sin \alpha = \frac{m\sqrt{3}}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$$

Существуют различные способы получения углеродных нанотрубок: электродуговой разряд, лазерная абляция, химическое осаждение из газовой фазы (CVD) и электрохимическое осаждение. Выбор метода зависит от цели использования и желаемого эффекта.

Сравнительные характеристики углеродного волокна и материала на основе углеродных нанотрубок (УНТ) Таблица 3

| Характеристика          | Углеродное волокно   | Углеродные нанотрубки (УНТ)          |
|-------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Структура               | Скрученные нити      | Цилиндрические графеновые листы      |
| Прочность на растяжение | Очень высокая        | Исключительно высокая (теоретически) |
| Модуль упругости        | Высокий              | Чрезвычайно высокий                  |
| Электропроводность      | Зависит от типа      | Высокая (может быть полупроводником) |
| Теплопроводность        | Хорошая              | Очень высокая                        |
| Площадь поверхности     | Относительно низкая  | Очень высокая                        |
| Анизотропия             | Выраженная           | Менее выраженная (в отдельных УНТ)   |
| Стоимость               | Относительно низкая  | Высокая                              |
| Простота производства   | Относительно простая | Сложная                              |
| Масштабируемость        | Высокая              | Ограниченная                         |

Ключевые отличия и нюансы:

– Прочность: углеродные нанотрубки потенциально намного прочнее углеродного волокна. К сожалению, полная реализация этого потенциала в макроскопических материалах пока невозможна из-за проблем с ориентацией и равномерным распределением нанотрубок.

– Стоимость и масштабируемость: В отличие от углеродного волокна, производство углеродных нанотрубок (УНТ) в промышленных масштабах обходится значительно дороже и сложнее. Именно эта высокая стоимость и сложность производства препятствуют повсеместному внедрению УНТ, несмотря на их выдающиеся характеристики.

Электропроводность: Структура (хиральность) углеродных нанотрубок определяет их способность проводить ток, проявляя либо металлические, либо полупроводниковые свойства. Проводимость углеродных волокон обычно ниже, но остается достаточно значимой для определенных применений.

– Функциональность: Значительный размер площади поверхности углеродных нанотрубок (УНТ) является ключевым фактором, определяющим их ценность для разнообразных применений, включая каталитические реакции, разработку чувствительных датчиков и эффективное хранение энергии.



Безусловно углеродное волокно прочно зарекомендовало себя как надежный конструкционный материал, отличающийся хорошими механическими характеристиками и доступной ценой, материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) демонстрируют еще более впечатляющие возможности. Тем не менее, их высокая стоимость и технологические сложности пока препятствуют их повсеместному внедрению.

По мере совершенствования производственных процессов и технологий, УНТ станут ценным ресурсом для разработки и производства беспилотных летательных аппаратов. Уникальные свойства многофункциональных полимерных нанокомпозитов на основе углеродных нанотрубок сделают возможным создание БПЛА, превосходящих существующие аналоги в специфических областях применения:

- Защита корпуса. Эффективно повысят защищенность БПЛА от электромагнитного и лазерного излучения.

- Улучшение характеристик аккумуляторов. Позволят создать многофункциональный полимерный нанокомпозит, который повышает защиту БПЛА от электромагнитного излучения и лазерного излучения.

- Защита от перегрева. Углеродные нанотрубки обеспечивают эффективную термозащиту узлов и элементов беспилотных летательных аппаратов, предотвращая их критический нагрев. Это способствует повышению лётных характеристик, таких как дальность и время нахождения в воздухе, в условиях экстремально высоких температур.

#### Заключение

Таким образом, полученные результаты от применения современных композитных материалов позволяют перейти на следующий уровень исследований, постройки опытной модели корпуса летательного аппарата и придания новых функциональных свойств, например, возможности самодиагностики при разрушении корпуса, что в свою очередь откроет путь к созданию более безопасных, надежных и интеллектуальных летательных аппаратов будущего, способных самостоятельно оценивать свое техническое состояние и своевременно сигнализировать о потенциальных проблемах, минимизируя риски и повышая эффективность эксплуатации, что является критически важным шагом в развитии авиационной техники и открывает новые перспективы для дальнейших инноваций в области материаловедения и бортовых систем самодиагностики, способствуя повышению уровня безопасности полетов и снижению эксплуатационных расходов за счет превентивного обслуживания и раннего выявления дефектов, что в конечном итоге приведет к созданию нового поколения летательных аппаратов с улучшенными характеристиками и расширенными возможностями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марочник сталей и сплавов. 7-е изд., стереотипное / Ю.Г. Драгунов, М28 А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. - М.: Инновационное машиностроение, 2021. -1216 с.
2. Borovik, S.; Kuteynikova, M.; Sekisov, Y. Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. 2023. №23. p.351.
3. Перечень изделий РКТ. <https://www.roscosmos.ru/34744/>
4. Методические рекомендации по организации и проведению в федеральном агентстве воздушного транспорта подтверждения соответствия юридических лиц, осуществляющих разработку воздушных судов и другой авиационной техники установленным требованиям. -2017 г. - 19 с. <https://favt.gov.ru/public/materials/c/a/b/2/c/ cab2c5fa6cd94883a385e7ef5f33fc5a.pdf>.
5. Москаленко Л.В., Стреляев Д.В., Чичков Б.А., Тимонин А.Л. Основы теории и конструкции авиационных двигателей: учебное пособие. -М.: МГТУ ГА, 2015. -64 с.
6. Моисеев В.С. Силовые установки перспективных беспилотных вертолетов. -Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2020. - 284 с.
7. NASA Independent Review Team Orb-3 Accident Investigation Report. Executive Summary // National Aeronautics and Space Administration: сайт. - URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3\\_irt\\_execsumm\\_0.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf).
8. Дмитриев С. А., Симонова Е. С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007-2020 гг// НикСС. 2023. №1 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-otkazov-i-povrezhdeniy-aviatsionnyh-dvigatelay-za-period-2007-2020-gg> (дата обращения: 10.04.2026).

УДК 681.786

**Мурашкина<sup>1</sup> Т.И., Бадеев<sup>2</sup> В.А., Бадеева<sup>3</sup> Е.А., Лазуткин<sup>4</sup> Д.А.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>4</sup> Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт Пенза, Россия

<sup>1</sup> timurashkina@mail.ru

<sup>2</sup> vladbadeev4464@gmail.com

<sup>3</sup> badeeva\_elena@mail.ru

<sup>4</sup> seven\_son@mail.ru

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

**Аннотация.** Важной задачей при разработке новых волоконно-оптических датчиков различных физических величин является снижение их дополнительных погрешностей, в первую очередь температурной погрешности. Разработана методика определения функции влияния повышенной и пониженной температуры окружающей среды на волоконно-оптические датчики. В качестве объекта исследований взят волоконно-оптический датчик низкого давления (диапазон измерения 100...500 г/см<sup>2</sup>). Приведены результаты оценки его точности с помощью полученного по результатам предварительных экспериментальных исследований нового волоконно-оптического датчика. Доказано, что при оценке результатов измерения с учетом функции влияния дополнительная температурная погрешность может быть снижена в 2...3 раза.

**Ключевые слова:** методика, функция влияния, волоконно-оптический датчик, дополнительная температурная погрешность, измерение, низкое давление

**Murashkina<sup>1</sup> T.I., Badeev<sup>2</sup> V.A., Badeeva<sup>3</sup> E.A., Lazutkin<sup>4</sup> D.A.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>4</sup> Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

<sup>1</sup> timurashkina@mail.ru

<sup>2</sup> vladbadeev4464@gmail.com

<sup>3</sup> badeeva\_elena@mail.ru

<sup>4</sup> seven\_son@mail.ru

## **METHOD FOR DETERMINING THE TEMPERATURE RESPONSE FUNCTION OF FIBER-OPTIC SENSORS**

**Abstract.** An important task in the development of new fiber-optic sensors for various physical quantities is to reduce their additional errors, primarily the temperature error. A methodology has been developed for determining the function of the influence of increased and decreased ambient temperature on fiber-optic sensors. A low-pressure fiber-optic sensor (measurement range 100...500 g/cm<sup>2</sup>) was taken as the research object. The results of its accuracy assessment using the newly developed fiber-optic sensor based on preliminary experimental studies are presented. It has been proven that when evaluating measurement results taking into account the influence function, the additional temperature error can be reduced by 2...3 times.

**Keywords:** methodology, influence function, fiber-optic sensor, additional temperature error, measurement, low pressure

### **Введение**

Метрологические характеристики информационно-измерительных систем (ИИС) ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) напрямую зависят от метрологических характеристик входящих в их состав датчиков [1, 2]. Большинство волоконно-оптических датчиков (ВОД), входящих в состав волоконно-оптических ИИС (ВОИИС) имеют существенно лучшие метрологические характеристики относительно своих электрических аналогов [3-6]. Но, несмотря на это, любой ВОД имеет дополнительную температурную погрешность, если он функционирует в условиях РК и АТ. Для снижения этих погрешностей применяются разные подходы: конструктивные, схемно-технические и др. [3, 7]. Если в составе ВОИИС есть ВОД температуры, то можно применить способ снижения температурной дополнительной погрешности введением поправки на систематическую составляющую, каковой, как правило, является температурная погрешность.

Цель работы – доказательство снижения дополнительной температурной погрешности ВОД при использовании функции влияния температуры (ФВТ).

### **Методы и подходы**

При проведении исследований использовались положения теории измерений, математическая обработка полученных результатов.

Поставленная цель достигается разработкой методики определения ФВТ на примере ВОД низкого давления [8] и проведения их предварительных температурных испытаний.

Для проведения экспериментальных исследований по определению температурной погрешности ВОД использовалась камера холода и тепла SBT-211 [9] с использованием специальных креплений (рисунок 1).

Камера SBT-211 предназначена для испытаний изделий электронной техники, приборов и других изделий на стойкость к воздействию повышенной и пониженной температуры воздуха в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ Р 51368-99, ГОСТ



Р 51369-99, ГОСТ 12997-84, ГОСТ 20.57.406-81, ГОСТ РВ 20.57.306-98 и др. (таблица 1).



Рисунок 1 – Камера тепла и холода SBT-211

Основные технические характеристики камеры холода и тепла SBT-211 Таблица 1

| Наименование характеристики                  | Значение                                                 | Единицы изм. |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|
| Температурные характеристики                 |                                                          |              |
| Нижняя граница воспроизводимой температуры   | минус 60                                                 | °C           |
| Верхняя граница воспроизводимой температуры  | 150                                                      | °C           |
| Колебание температуры                        | ± 0,2                                                    | °C           |
| Градиент температуры в рабочем объеме        | ± 2,5<br>от минус 60 до +100<br>± 4<br>от 100 до +150 °C | °C           |
| Внутренние размеры рабочего объема           |                                                          |              |
| Ширина × Высота × Длина                      | 300×300×250                                              | мм           |
| Объем рабочей зоны                           | 22,5                                                     | л            |
| Технологические отверстия рабочего объема    | 50 мм – 1шт.                                             |              |
| Внешние габаритные размеры                   |                                                          |              |
| Ширина × Высота × Глубина                    | 440×625×786                                              | мм           |
| Размеры смотрового окна                      | 200 × 200                                                | мм           |
| Контроллер управления климатической камерой  |                                                          |              |
| Сенсорный экран                              | 8"                                                       |              |
| Дискретность индикации и уставки температуры | 0,01                                                     | °C           |
| Интерфейсы удаленного управления             | RS-232, RS-485, Ethernet<br>10/100/1000                  |              |
| Тип датчика температуры                      | PT1000                                                   |              |
| Электрические данные                         |                                                          |              |
| Тип питания                                  | 1ф 220В                                                  |              |
| Максимальный потребляемый ток, не более      | 13,5                                                     | А            |

В нашем случае камера холода и тепла SBT-211 используется для выполнения научных исследований по созданию перспективных волоконно-оптических датчиков

физических величин, эксплуатируемых в условиях воздействия повышенных и пониженных температур.

Результаты

Разработана методика определения функции влияния температуры повышенной и пониженной температуры окружающей среды на ВОД. В основу предлагаемой методики положена общая методика определения функций влияния средств измерений. Ввиду особенности конструктивного исполнения объекта исследований [8,10] данная методика адаптирована под решаемую задачу.

В соответствии с работой [11] вид функции влияния температуры (ФВТ)  $\Psi(T, P, \alpha)$  рекомендуется определять на начальной стадии исследований и разработки ВОДУН по формуле:

$$\Psi(T, P) = \Theta_0 + \Theta_1 T + \Theta_2 T^2 + \Theta_3 TP + \Theta_4 T^2 P + \Theta_5 P, ; \quad (1)$$

где  $\Theta_0 \dots \Theta_5$  – коэффициенты ФВТ.

Для упрощения ФВТ с минимальной методической погрешностью (менее 1 %) предложено в качестве исходной взять следующую математическую модель:

$$\Psi(T) = \Theta_0 + \Theta_1 T + \Theta_2 T^2. ; \quad (2)$$

В соответствии с работой [11] план эксперимента по определению коэффициентов ФВТ ВОД должен соответствовать приведенному в таблице 2. В эту же таблицу заносятся результаты измерений выходного напряжения  $U(P, T)$ .

План эксперимента для определения коэффициентов ФВТ

Таблица 2

| Вид функции влияния температуры $\Psi(P, T)$ | Номер опыта                                                           |                                                         |                                                         |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                              | 1                                                                     | 2                                                       | 3                                                       |
| $\Theta_0 + \Theta_1 T + \Theta_2 T^2$       | $T_1 = T_{min}$<br>$P_1 = P_{ny}$                                     | $T_2 = T_{ny}$<br>$P_2 = P_{ny}$                        | $T_3 = T_{max}$<br>$P_3 = P_{ny}$                       |
|                                              | $T_1 = \text{минус } 40^\circ \text{C}$<br>$P_1 = 100 \text{ г/см}^2$ | $T_2 = 25^\circ \text{C}$<br>$P_2 = 100 \text{ г/см}^2$ | $T_3 = 60^\circ \text{C}$<br>$P_3 = 100 \text{ г/см}^2$ |
|                                              | $U_1(P_1, T_{min})$<br>750 мВ                                         | $U_2(P_2, T_{ny})$<br>730 мВ                            | $U_3(P_3, T_{max})$<br>710 мВ                           |

В таблице 2 приняты следующие сокращения:

$\Psi(\alpha)$  – функция влияния температуры;  $\Theta_{0\dots n}$  – коэффициенты ФВ температуры на значения измеряемой физической величины;  $T_{min\dots T_{max}}$  – диапазон изменения температуры;  $T_{ny}$  – значение температуры в нормальных условиях,  $P_{ny}=P_1=P_2=P_3$  – нормальное давление окружающей среды.

Проведение эксперимента по определению ФВТ проводится в следующей последовательности:

1. Собирается схема в соответствии с рисунком 2.

2. ВОД устанавливается внутри трубы с низкой теплопроводностью в соответствии с рисунком 3 и указаниями, приведенными в статье [12]. Большая часть волоконно-оптического кабеля протягивается за пределы камеры холода и тепла SBT-2011 через технологическое отверстие, внутри рабочего объема камеры остается приблизительно 1 м волоконно-оптического кабеля (ВОК).

Примечание. В соответствии со схемой градуирования для устойчивого положения датчика он располагается в полости узкой трубы, внутренний диаметр которой равен внешнему диаметру воспринимающего элемента датчика. Выступом или неподвижной частью корпуса датчик упирается о дно трубы. Для воспроизведения низкого давления однозначные меры веса массой  $m$  поочередно накладываются на воспринимающий элемент датчика. Значение меры давления  $P$  определяется по формуле  $P=mg/S$ , где  $S$  – часть площади поверхности воспринимающего элемента, на которую установлена мера веса массой  $m$  [12].

3. В камере холода и тепла SBT-2011 устанавливается пониженная температура (в нашем случае минус  $(40 \pm 3)^\circ \text{C}$ ), при которой датчик необходимо выдержать 2 ч.

4. Включаются измерительные приборы и прогреваются в течение времени, установленного инструкцией по эксплуатации на эти приборы, осуществляется их калибровка. На вход датчика подается напряжение питания.

5. С помощью цифрового мультиметра Keysight 34461A (допускается замена мультиметра на аналогичные приборы с соответствующим классом точности) снимаются значения выходные напряжения  $U_i(P, T)$ .

Результаты измерения напряжения  $U_1(P_1, T_{min})$  заносятся в таблицу 2.

6. В камере холода и тепла SBT-2011 устанавливается температура  $(25 \pm 3)^\circ \text{C}$ , при которой датчик необходимо выдержать 2 ч, после чего проводятся измерения выходного напряжения.

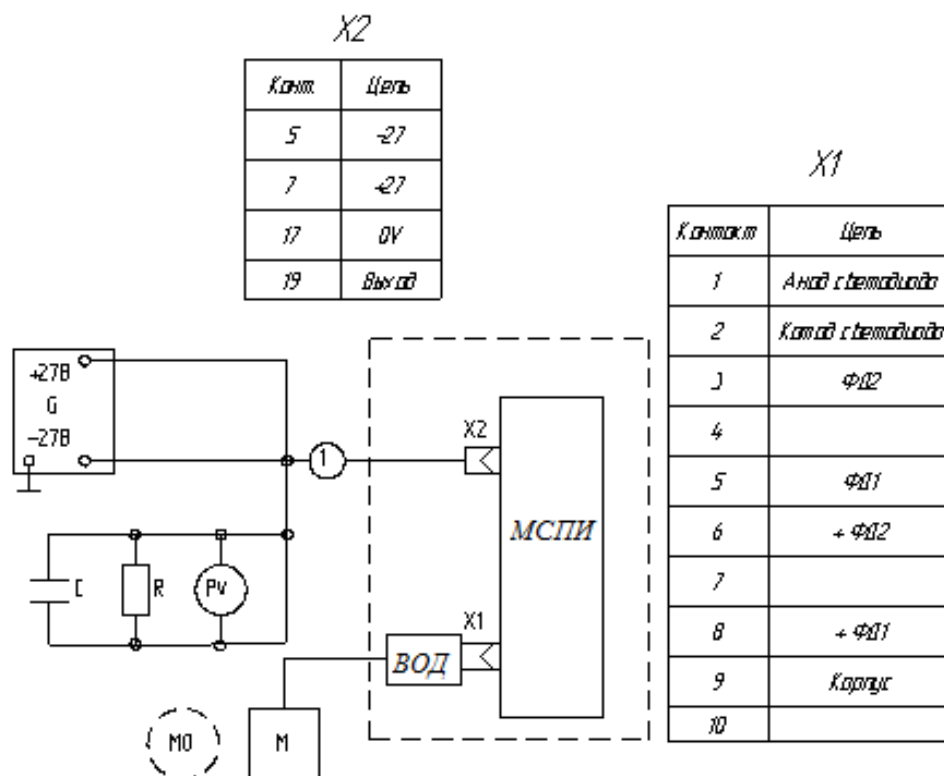


Рисунок 2 – Схема контроля выходного напряжения ВОД совместно с электронным блоком МСПИ

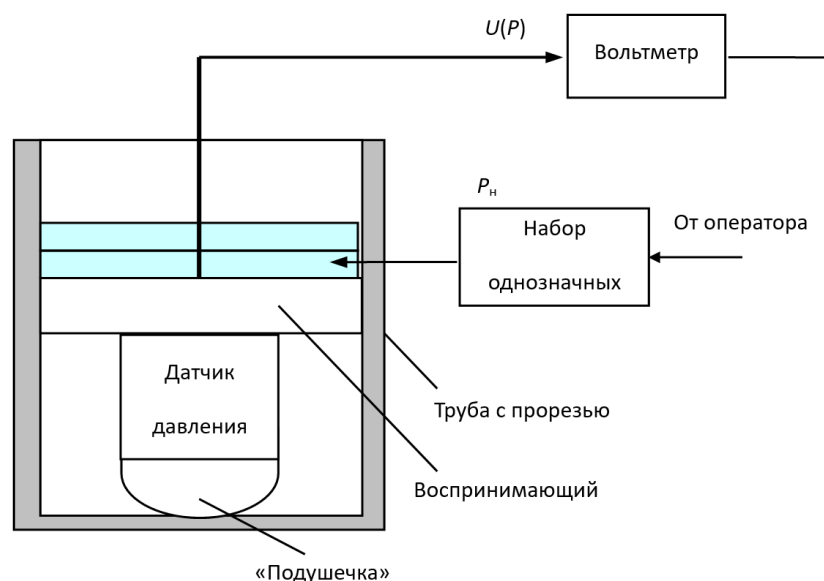


Рисунок 3 – Схема градуирования ВОМД соответствии с работой [12]

Результаты измерения напряжения  $U_2(P_2, T_{ну})$  заносятся в таблицу 2.

7. В камере тепла и холода SBT-2011 устанавливается повышенная температура (в нашем случае  $(60 \pm 3)^\circ\text{C}$ ), при которой датчик необходимо выдержать 2 ч, после чего проводить измерения выходного напряжения.

Результаты измерения напряжения  $U_3(P_3, T_{max})$  заносятся в таблицу 2.

8 Полученные в результате эксперимента значения выходного напряжения и значения измеряемой физической величины (в нашем случае давления  $P$ ) и температуры  $T$  необходимо подставить в формулу выбранной функции влияния (см. таблицу 2).

В результате будет получена следующая система уравнений:

$$U_1(P_1, T_{min}) = \Theta_0 + \Theta_1 T_{min} + \Theta_2 T_{min}^2$$

$$U_2(P_2, T_{ну}) = \Theta_0 + \Theta_1 T_{ну} + \Theta_2 T_{ну}^2$$

$$U_3(P_3, T_{max}) = \Theta_0 + \Theta_1 T_{max} + \Theta_2 T_{max}^2,$$

где  $U_1(P_1, T_{min})$ ,  $U_2(P_2, T_{ну})$ ,  $U_3(P_3, T_{max})$  – измеренные во время испытаний значения выходного напряжения ВОД совместно с электронным блоком МСПИ.

Решение данной системы позволит определить коэффициенты ФВТ  $\Theta_{0...n}$ .

В качестве примера такая система составлена для результатов предварительных температурных испытаний ВОД низкого давления [6]:

$$750 = \Theta_0 - \Theta_1 40 + \Theta_2 40^2$$

$$730 = \Theta_0 + \Theta_1 25 + \Theta_2 25^2$$

$$710 = \Theta_0 + \Theta_1 60 + \Theta_2 60^2,$$

на основании решения которой определены коэффициенты ФВ:  $\Theta_0 = 734$  мВ,  $\Theta_1 = -0,256$  мВ/°С,  $\Theta_2 = 0,0037$  мВ/°С<sup>2</sup>.

Окончательно ФВТ имеет следующий вид:  $\Psi(P, T) = 734 - 0,256T + 0,0037T^2$ .

При оценке результатов измерения с учетом ФВТ дополнительная температурная погрешность может быть снижена в 2...3 раза. В частности, по результатам проведенных испытаний максимальное значение абсолютной погрешности составило до  $\pm 0,7$  мВ при минус 40 °С и  $\pm 0,6$  мВ при +60 °С, соответственно относительная погрешность не превысила 1,75 %, что в 2 раза меньше погрешности ВОД без учета ФВТ.

#### Закключение

Приведены результаты оценки его точности с помощью полученных по результатам предварительных экспериментальных исследований нового волоконно-оптического датчика. Доказано, что при оценке результатов измерения с учетом функции влияния дополнительная температурная погрешность может быть снижена в 2...3 раза.

Данная методика определения ФВТ с успехом может быть применена для ВОД других физических величин: перемещения, угла поворота, деформации и др..

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда

№ 25-29-20107, <https://rscf.ru/project/25-29-20107/>

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурашкина Т.И. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники // Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоемком приборостроении («Свет-2018») : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. проф. Т. И. Мурашкиной. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. 276 с. С.230 – 239.
2. Бадеева Е.А., Бадеев В.А., Мурашкина Т.И. Проектирование искробезопасных волоконно-оптических датчиков для систем мониторинга технического состояния крупных сооружений//Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3 (51). С. 101-109.
3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики/ пер. с англ. М. : Техносфера, 2007. 384 с.
4. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А., Бадеев В.А. Конструктивно-технологическое решение волоконно-оптического датчика для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 108-115. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12.
5. Томышев К.А. Баган, В.А. Астапенко, В.А. Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности//Труды МФТИ. 2012. Т.4. № 2. С.64-72.
6. Е.А., Мурашкина Т.И., Бадеев В.А., Кукушкин А.Н. Искробезопасность волоконно-оптических датчиков//Труды международного симпозиума "Надежность и качество" -Изд-во Пенз.гос.ун. 2025. Т. 2. С. 288-292.
7. Фёдоров В.В., Шлык В.А. Методы обработки результатов измерений. – СПб.: Лань. 2019. 288 с.
8. Мурашкина Т.И., Бадеев В.А., Бадеева Е.А. Качество измерений с помощью волоконно-оптического датчика низкого давления для узких полостей с неровными поверхностями// Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2025. Т. 2. С. 406-408.
9. Настольная бесшумная камера холода и тепла SBT-211. URL: <http://cryo-tech.ru/products/sb/sbt-2x1/> (дата обращения: 20.01.2019).
10. Патент на изобретение РФ 2829195 С1 Волоконно-оптический датчик давления Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А., Серебряков Д.И., Бадеев В.А., Хасаншина Н.А. // опубл. 25.10.2024.
11. Мурашкина Т.И. Техника физического эксперимента и метрология. – СПб.: Политехника. 2015. 138 с.
12. Мурашкина Т.И., Бадеев В.А., Истомина Т.В. Градуировка волоконно-оптического датчика низкого давления / Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции/ под. ред. С.У. Увайсова. Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2025. С. 74-78.

УДК 681.518.5:681.586

**Бадеева<sup>1</sup> Е.А., Мурашкина<sup>2</sup> Т.И., Лазуткин<sup>3</sup> Д.А., Бадеев<sup>4</sup> В.А.**

<sup>1,2,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3</sup> Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

<sup>1</sup> badeeva\_elena@mail.ru

<sup>2</sup> timurashkina@mail.ru

<sup>3</sup> lazdalex@gmail.com

<sup>4</sup> vladbadeev4464@gmail.com

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ**

**Аннотация.** Проведен анализ методов удаленного контроля работоспособности датчиковой аппаратуры. Метод удаленной проверки работоспособности датчи́ко-преобразующей аппаратуры подбирается с учетом типа устройств, поставленных задач, используемых технологий, а также требований к точности и надежности диагностики. Наиболее прогрессивными методами удаленной проверки и контроля работоспособности средств измерений являются самотестирование и IoT-платформы дистанционной диагностики.

**Ключевые слова:** удаленный контроль, проверка, работоспособность, дистанционный контроль, датчик, датчи́ко-преобразующая аппаратура, имитация, тестирование, самодиагностика

**Badeeva<sup>1</sup> E.A., Murashkina<sup>2</sup> T.I., Lazutkin<sup>3</sup> D.A., Badeev<sup>4</sup> V.A.**

<sup>1,2,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3</sup> Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

<sup>1</sup> badeeva\_elena@mail.ru

<sup>2</sup> timurashkina@mail.ru

<sup>3</sup> lazdalex@gmail.com

<sup>4</sup> vladbadeev4464@gmail.com

## **ANALYSIS OF METHODS FOR REMOTE MONITORING OF THE OPERATIONAL CAPABILITY OF SENSOR-TRANSFORMER EQUIPMENT**

**Abstract.** An analysis of methods for remote monitoring of the operability of sensor equipment has been conducted. The method of remote operability testing of sensor-converting equipment is selected taking into account the type of devices, the assigned tasks, the technologies used, as well as the requirements for the accuracy and reliability of diagnostics. The most advanced methods of remote testing and monitoring of the operability of measuring instruments are self-testing and IoT platforms for remote diagnostics.

**Keywords:** remote monitoring, testing, operability, remote control, sensor, sensor-converting equipment, simulation, testing, self-diagnosis

**Введение.** Удаленный контроль работоспособности датчиковой аппаратуры может осуществляться разными методами в зависимости от типа датчика, его назначения и технических возможностей системы мониторинга (таблица 1) [1-20]. Основные подходы включают автоматизированный контроль, использование специальных устройств для тестирования, анализ данных и проверку каналов связи.

**Обсуждение.** Автоматизированный контроль с анализом сигналов предполагает периодическую подачу команды с приемно-контрольного прибора (ПКП) и анализ ответного сигнала датчика. Например, в системах охранных извещателей может использоваться смена полярности питания извещателя по команде с ПКП. ПКП автоматически обрабатывает ответный сигнал и делает вывод о работоспособности устройства.

Для некоторых типов датчиков применяются дополнительное специализированное оборудование, специальные устройства для тестирования. Например, для дымовых извещателей применяется лазерный тестер, что позволяет дистанционно воздействовать на светодиод извещателя и проверить его работоспособность [4].

Тестовые аэрозоли, фены, аттенюаторы – средства для имитации опасных факторов пожара применяются при проверке пожарных извещателей [5]. Устройство для дистанционного контроля параметров коэффициента преобразования пьезоэлектрических акселерометров при длительной эксплуатации используется метод электрического возбуждения резонансных колебаний акселерометра с последующей регистрацией и анализом сигналов [6].

Современные системы часто оснащаются модулями беспроводной связи, которые передают сигналы и статусы готовности элементов системы. При неисправности датчика система может автоматически уведомлять пользователя через приложение, электронную почту или другие каналы связи [7].

Наиболее прогрессивные методы удаленной проверки и контроля работоспособности средств измерений – это самотестирование и IoT-платформы для дистанционной диагностики датчиковой аппаратуры.

Методы удаленного контроля работоспособности датчиков-преобразующей аппаратуры [1-20]

Таблица 1

| Методы проверки                                                                                                              | Характеристика метода                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1 Программный мониторинг и самодиагностика</b>                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 1.1 Промышленный интернет вещей IIoT, IoT-платформы, методы машинного обучения                                               | для сбора, визуализации и анализа данных с датчиков в реальном времени; системы позволяют отслеживать отклонения, формировать отчёты и отправлять уведомления при выявлении аномалий; осуществляется предиктивное обслуживание; системы IoT собирают данные о состоянии оборудования и с помощью алгоритмов машинного обучения предсказывают возможные поломки, что позволяет планировать техническое обслуживание, минимизируя простои и снижая затраты на ремонт            |
| 1.2 Внедрение логических зондов (logic probe) («датчиков ошибок»), логические анализаторы (logic analyzer) и самодиагностики | самодиагностика, как это процесс постоянного мониторинга сигналов от датчиков и исполнительных механизмов; полученные данные сравниваются с контрольными (образцовыми) значениями, хранящимися в памяти управляющего контроллера; реализуются автоматические проверки: анализируются скачки, падения или зашумлённость показаний, а также наличие датчика в списке подключённых устройств; при выявлении подозрительных изменений система формирует уведомление для оператора |
| <b>2 Протоколы передачи данных</b>                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 2.1 Протоколы MQTT и CoAP                                                                                                    | обеспечивают надёжную передачу данных даже при ограниченной пропускной способности, что позволяет оперативно получать информацию о состоянии датчиков и выявлять сбои                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>3 Специальные устройства для тестирования</b>                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 3.1 Имитация воздействия на датчик                                                                                           | используются специальные тестеры (например, для пожарных извещателей) лазерные или аэрозольные, которые дистанционно имитируют воздействие (дым, световой сигнал) и фиксируют реакцию датчика; подход позволяет проверить работоспособность без физического доступа к устройству                                                                                                                                                                                              |
| 3.2 Лазерный тестер                                                                                                          | для проверки дымовых оптико-электронных пожарных извещателей; позволяет дистанционно воздействовать на элементы средства измерения (извещателя) и проверить его реакцию                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>4 Анализ калибровочных и тарировочных данных технологических процедур настройки измерительной системы</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 4.1 Анализ калибровочных и тарировочных данных                                                                               | в случае датчиков уровня топлива или расхода воды важно регулярно проверять корректность калибровочных таблиц и настроек в программном обеспечении: неточности в тарировке, фильтрации или подключении могут приводить к некорректным значениям, которые выявляются при анализе отчётов и графиков                                                                                                                                                                            |
| <b>5 Дистанционный контроль с помощью специальных технических средств</b>                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 5.1 Дистанционная поверка и контроль с помощью специальных технических средств                                               | для счётчиков воды и других расходомеров применяются устройства, которые фиксируют параметры потока и передают данные через радиоканал или интернет, что позволяет проводить поверку и диагностику без демонтажа оборудования                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>6 Автоматизированный контроль с подачей команд</b>                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 6.1 Формирование тест-сигналов                                                                                               | применяется для оптоэлектронных датчиков пламени и взрыва; устройство позволяет тестировать датчики, реагирующие на различные типы очагов пламени, и проверять их на наличие ложных срабатываний                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 6.2 Метод дистанционного контроля с имитатором воздействия                                                                   | может использоваться для охранных извещателей, который периодически активируется по команде с приёмно-контрольного прибора (ПКП); имитатор оказывает воздействие на чувствительный элемент извещателя, аналогичное минимальному воздействию нарушителя; ПКП анализирует ответы и делает вывод о работоспособности извещателя                                                                                                                                                  |
| <b>7 Анализ данных и мониторинг каналов связи</b>                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 7.1 Проверка качества связи в беспроводных системах                                                                          | реализуется проверка отправкой тестовых посылок и формирование сообщений о потере связи в заданный интервал                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.2 Использование генераторов сигналов для контроля исправности каналов связи | в системах с массивом датчиков может применяться генератор для контроля исправности канала; генератор сигналов создаёт периодические или непериодические сигналы разной формы и частоты; при работе он подаёт тестовые сигналы на компоненты или канал связи; по изменениям формы или параметров сигнала можно судить о состоянии диагностируемого оборудования |
| 7.3 Анализ графиков и данных                                                  | в системах мониторинга уровня топлива можно анализировать графики для выявления некорректных показаний (падение показаний до нуля без восстановления, скачки и т.п.)                                                                                                                                                                                            |

Такие технические решения как самотестирование внедряются для высокоточных датчиков, применяемых в экстремальных условиях в случаях, когда нет возможности провести поверку в лаборатории (в буровых установках, в скважинах, в горной местности и т.п.). Основные функции самодиагностики: оценка состояния и мониторинг технического состояния оборудования в реальном времени; локализация неисправностей, обнаружение места неисправности (например, искажение сигнала, обрыв линии, дрейбег контактов); предупреждение и передача уведомлений об неисправностях на верхний уровень системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)).

IoT-платформы для диагностики датчиков обеспечивают удаленный мониторинг, сбор данных в реальном времени, настройку оповещений при сбоях и предиктивное обслуживание. Ключевые решения включают ThingsBoard, Azure IoT, AWS IoT, а также специализированные системы, такие как Datonis и NA.Cloud, которые позволяют выявлять неисправности (зависание, недостоверные данные) на ранних стадиях.

Программный мониторинг и самодиагностика активно внедряются в таких сферах жизнедеятельности как электроэнергетика, теплоснабжение, нефтегазовый сектор, транспортная система, спутниковый IoT, а также в системах мониторинга транспорта, автономных транспортных средств и медицинских приборов.

**Заключение.** Выбор метода удаленного контроля и проверки работоспособности датчиков-преобразующей аппаратуры зависит от конкретных задач, типа датчика, доступных технологий и требований к точности и надежности проверки. Автоматизированные системы позволяют проводить регулярный профилактический осмотр и оперативно устранять неполадки. Некоторые методы могут быть применимы не ко всем типам датчиков или ситуациям.

При контроле работоспособности датчиковой аппаратуры необходимо учитывать требования технической документации устройства и нормативные документы, которые могут регламентировать методы испытаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрохин С.В., Соколов Ю.В. Патент на изобретение RU2720216C2. Способ дистанционного контроля работоспособности охранных извещателей и устройство для его осуществления. Дата подачи заявки: 16.07.2018. Опубликовано: 28.04.2020 Бюл. № 13.
2. Бурдяло А.Л., Громаков Е.И. Автоматизация диагностики неисправностей в системах управления с оператором // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 6 (25). С. 32-34.
3. Аллакин В.В., Голюнов М.В. Анализ научно-методического аппарата удалённого мониторинга технического состояния информационно-телекоммуникационных сетей и систем // Техника средств связи. 2020. № 4(152). С. 17-37.
4. ГОСТ Р 59638-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы пожарной сигнализации. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытаний на работоспособность (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 24.08.2021 # 791-ст). URL: <https://nitann.ru/wp-content/uploads/2025/01/gost-r-59638-2021-sistemy-pozharnej-signalizacii.pdf> (дата обращения 21.03.2026).
5. Проверка работоспособности дымовых оптико-электронных пожарных извещателей. URL: <https://ab-dpo.ru/portal/pk-pb-video/proverka-rabotosposobnosti-dymovyx-optiko-elektronnykh-pozharnykh-izveshchateley/> (дата обращения 21.03.2026).
6. Субботин М.И. Патент на изобретение RU2176396C1. Способ дистанционного периодического контроля коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра. Дата публикации патента: 27.11.2001.
7. Краткая инструкция по диагностике датчиков, выключателей, сигнализаторов, прерывателей указателей поворотов и стеклоомывателей производства ОАО «Экран».
8. URL: [https://www.ekranbel.by/user/file/Рекомендации%20по%20датчикам%2019\\_09\\_18.pdf](https://www.ekranbel.by/user/file/Рекомендации%20по%20датчикам%2019_09_18.pdf) (дата обращения 21.03.2026).
9. Mahmudul Hasan, Md. Milon Islam, Md Ishrak Islam Zarif, M.M.A. Hashem. Attack and anomaly detection in IoT sensors in IoT sites using machine learning approaches. Internet of Things. Volume 7, September 2019, 100059. doi.org/10.1016/j.iot.2019.100059.
10. Корнилова М.И., Бусыгин С.В., Ковальников В.Н., Клячкин В.Н. Прогнозирование качества функционирования технического объекта с использованием машинного обучения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 152-158. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-14.
11. Тропин А.Н., Дийков Л.К. Патент на изобретение RU2367025C2. Формирователь тест-сигнала для дистанционного контроля работоспособности инфракрасных датчиков пламени и взрыва. Дата публикации заявки: 27.03.2009. Опубликовано: 10.09.2009 Бюл. № 25.
12. Тропин А.Н. Формирователь тест-сигнала для дистанционного контроля работоспособности датчиков пламени и взрыва // Пожаровзрывобезопасность. 2008. №2. С. 70-73.

13. Михайлов П.Г., Соколов А.В., Аналиева А.У., Михайлов А.П., Фадеев Е.Д. Самодиагностика в интеллектуальных преобразователях физических величин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. №1 (27). С. 33-41.
14. Шириков В. От бабушки-инспектора до полной автоматизации: эволюция и вызовы промышленного IoT в России. URL: <https://engineer.yadro.com/article/jevoljucija-i-vyzovy-iiot-v-rossii/> (дата обращения 21.03.2026).
15. IoT платформа. URL: <https://iot.ru/wiki/iot-platforma> (дата обращения 21.03.2026).
16. Исключительная автоматизированная диагностика ошибок через контекстные логи устройства без вмешательства пользователя. URL: <https://tuttex.ru/isklyuchitelnaya-avtomatizirovannaya-diagnostika-oshibok-cherez-kontekstnye-logi-ustroystva-bez-vmeshatelstva-polzovatelya/> (дата обращения 21.03.2026).
17. Почему так важна тарировка бака ГСМ. URL: <https://www.geoinformer.com/pochemu-tak-vazhna-tarirovka-baka-gsm/> (дата обращения 21.03.2026).
18. Возможна ли дистанционная проверка системы охраны? URL: [https://myremo.ru/blog/vozmojna\\_li\\_distantcionnaya\\_proverka\\_sistemyi\\_ohrany/](https://myremo.ru/blog/vozmojna_li_distantcionnaya_proverka_sistemyi_ohrany/) (дата обращения 21.03.2026).
19. Цифровые протоколы передачи данных в промышленной автоматизации. URL: <https://electricalschool.info/automation/2960-cifrovye-protokoly-v-promavtomatizacii.html> (дата обращения 21.03.2026).
20. Басков М.П., Левашов О.Д. Удаленный контроль массива датчиков. URL: [https://www.efaster.ru/novosti/udalennyy\\_kontrol\\_massiva\\_datchikov](https://www.efaster.ru/novosti/udalennyy_kontrol_massiva_datchikov) (дата обращения 21.03.2026).
21. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А., Бадеев В.А. Конструктивно-технологическое решение волоконно-оптического датчика для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 108-115. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12.



УДК 621:382

Ямпурин<sup>1</sup> М.А., Ямпурин<sup>2</sup> Н.П.

<sup>1,2</sup> Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, Арзамас, Россия

<sup>1,2</sup> kitres@apinntu.ru

### УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

**Аннотация.** Анализируются недостатки существующей точечной методики выбора материалов на основе комплексного показателя качества (КПК). Предложена модернизация методики выбора в виде ее разбиения на два этапа: сначала надо сузить число анализируемых вариантов на основе безусловных критериев предпочтения, а затем использовать классическую формулу с условными критериями. Для оценки КПК при диапазоне изменения свойств в критериях предпочтения использован минимаксный подход. С целью анализа робастности получаемых решений предложено использовать интервальную оценку при расчете КПК. В качестве примера приведен выбор композита для построения антенн. На основе предложенной методики из трех видов композита выбран оптимальный в виде нескольких типов углепластика по безусловному критерию предпочтения. На основе условных критериев предпочтения получены как точечная и диапазонная оценки, так и интервальная оценка КПК в виде графика и показано, что для антенн наиболее подходит углепластик УКН-2500.

**Ключевые слова:** комплексный показатель качества, антенна, композит, углепластик, оптимизация, условные и безусловные критерии предпочтения, точечная оценка, диапазонная и интервальная оценки, минимаксный подход

Yampurin<sup>1</sup> M.A., Yampurin<sup>2</sup> N.P.

<sup>1,2</sup> Arzamas Polytechnic Institute (branch) of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Arzamas, Russia

<sup>1,2</sup> kitres@apinntu.ru

### IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT MATERIAL SELECTION

**Abstract.** The shortcomings of the existing point-based methodology for material selection based on a comprehensive quality indicator (CQI) are analyzed. A modernization of the selection methodology is proposed in the form of its division into two stages: first, it is necessary to narrow down the number of analyzed options based on unconditional preference criteria, and then use the classical formula with conditional criteria. To assess the CQI with a range of changes in properties in the preference criteria, a minimax approach is used. To analyze the robustness of the obtained solutions, it is proposed to use interval estimation when calculating the CQI. As an example, the selection of a composite for antenna construction is carried out. Based on the proposed methodology, the optimal composite was chosen from three types in the form of several kinds of carbon fiber composites according to the unconditional preference criterion. Based on conditional preference criteria, both point and range estimates, as well as interval estimates of the CPC in the form of a graph, were obtained, and it was shown that carbon fiber UKN-2500 is most suitable for antennas.

**Keywords:** comprehensive quality indicator, antenna, composite, carbon fiber, optimization, conditional and unconditional preference criteria, point evaluation, range and interval evaluations, minimax approach

**Введение в современные методы проектирования электронных средств.** Выбор оптимальных проектных решений всегда находился в центре внимания разработчиков как в XX-ом, так и XXI-ом веке [1,2]. Основное внимание сегодня уделяется ранним стадиям проектирования электронных комплексов сложных технических систем [3,4]. При этом в тени остается выбор материалов для электронных средств (ЭС), хотя в XXI-м веке разработчику предлагается широкая номенклатура материалов с большим числом свойств, представленных в виде диапазонов их возможных значений. Оптимальный выбор материала является предпосылкой экономической прогрессивности изделия и определяется совокупностью свойств, отражающих в целом уровень её качества, превосходящий уровень качества лучших образцов отечественной и зарубежной техники. Известный научный подход к выбору материала ЭС проводится на основе комплексного показателя качества (КПК) [5, с.24] по формуле

$$Q = \sum_{i=1}^n \varphi_i a_i^*, \quad (1)$$

где  $n$  - число свойств;  $a_i^*$  - нормированные значения ( $a_i^* = q_i / q_{\max}$ , если улучшение качества характеризуется максимизацией свойств  $q_i$  выбираемых материалов,  $q_{\max}$  - максимальное из значений  $i$ -го свойства для выбираемых материалов),  $\varphi_i$  - весовые коэффициенты свойств, последние удовлетворяют условию нормировки  $\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1$ . Если улучшение качества характеризуется минимизацией величины свойства  $q_i$ , то соответствующие свойства необходимо поменять местами. Использование КПК в виде (1) на практике приводит к **точечной** оценке по следующим причинам:

- в качестве  $a_i^*$  используются усредненные значения свойств  $q_{i\text{ср}}$ , хотя современные материалы характеризуются, как правило, диапазоном  $q_{i\text{min}} \div q_{i\text{max}}$  изменения значений свойств;

- существует субъективность в выборе материала, поскольку необходимо обосновать выбор весовых коэффициентов, чаще используется экспертная оценка  $\varphi_i$ .

Большая номенклатура типоразмеров материалов делает точечную оценку весьма приближенной, а возможность вариации  $\varphi_i$  делает актуальной оценку робастности

полученного КПК относительно экспертного  $\varphi_i$ , что требует новых подходов к оптимизации материалов.

**Улучшение методики выбора материалов**. Исходя из системного подхода к оптимизации [1], предлагается выполнять выбор материала в два этапа:

- **на первом этапе** из нескольких материалов выбирается ряд нехудших (альтернативных) на основе безусловного критерия предпочтения (БКП), в качестве которого лучше брать наиболее важное свойство, без которого изделие частично или вовсе неработоспособно;

- **на втором этапе** осуществляется окончательный выбор материала на основе одного или нескольких условных (субъективных) критериев предпочтения (УКП) согласно (1). На этом этапе учитываются диапазоны изменений свойств  $q_{imin} \div q_{imax}$  материалов при расчете КПК по минимаксному подходу, что гарантирует получение положительного результата даже в самых неблагоприятных условиях [6]

$$Q_{max} = \sum_{i=1}^n \varphi_i a_{imax}^*, \quad Q_{min} = \sum_{i=1}^n \varphi_i a_{imin}^* \quad (2)$$

С целью снижения субъективности принимаемых решений и оценки робастности необходима вариация  $\varphi_i$  в соотношении (2), в результате получается **интервальная** оценка КПК.

**Выбор композитного материала для антенн** Далее в работе обсуждаются особенности **реализации предложенной методики на примере выбора материала для антенн**. Антенны играют ключевую роль в современных системах связи и радиолокации, обеспечивая передачу и прием радиоволн. Традиционная конструкция любой антенны выполнена из металлических сплавов, которые имеют значительную массу, подвержены коррозионным процессам при высокой стоимости производства и сложности транспортировки, что существенно ограничивает их эксплуатационные возможности в условиях внешних воздействующих факторов (ВВФ). Однако на смену металлическим сейчас идут инновационные конструкции антенн на основе композитных материалов [6].

Использование современных композитов, таких как углепластики, керамопласты и стеклопластики с заданными диэлектрическими свойствами, открывает новые возможности для оптимизации характеристик антенных систем. Эти материалы сочетают в себе целый ряд уникальных свойств: малый удельный вес, высокую механическую прочность, устойчивость к агрессивным средам, возможность точного управления параметрами, а также относительную простоту обработки и монтажа. Особое значение имеет возможность реализации композитных конструкций в виде сложных геометрических форм с высокой точностью, что крайне важно для обеспечения требуемых характеристик антенны [7,8].

Выбор композитов произведем среди стекловолокон, арамидных и углеродных волокон, характеристики которых приведены в таблицах 1-3.

**На первом этапе выбора** из 3-х видов материалов выбирается ряд нехудших (альтернативных) на основе БКП, в качестве которого возьмем прочность на разрыв. Исходя из того, что любая антенна эксплуатируется в жестких и отнюдь не лабораторных условиях, от прочности на разрыв зависит ее надежность и живучесть: если разрушится конструкция или хотя бы один ее элемент, то другие свойства материала просто не понадобятся. Предел прочности при разрыве достигает максимальных значений до 7000 ГПа у высокопрочных марок, например, УКН-500 и УКН-2500, поэтому далее рассматриваются только углепластики, представленные в таблице 3, которые демонстрируют зависимость от степени ориентации графитоподобных структур.

Характеристика механических свойств различных типов стекловолокон Таблица 1

| Марка волокна                | Свойство | Е-стекло  | S-стекло  | R-стекло  | Кварцевое стекло |
|------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Предел прочности, ГПа        |          | 3,1÷3,8   | 4,5÷4,8   | 4,4÷4,6   | 3,5÷4,0          |
| Модуль упругости, ГПа        |          | 72÷75     | 85÷88     | 86÷88     | 70÷72            |
| Удлинение при разрыве, %     |          | 4,5÷5,0   | 5,3÷5,6   | 5,2÷5,5   | 4,8÷5,2          |
| Плотность, г/см <sup>3</sup> |          | 2,54÷2,57 | 2,46÷2,49 | 2,48÷2,51 | 2,18÷2,20        |

Характеристика механических свойств различных видов арамидного волокна Таблица 2

| Марка волокна                | Свойство | Русар-О | Русар-Н | Армос   | Терлон  |
|------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Плотность, г/см <sup>3</sup> |          | 1,43    | 1,44    | 1,45    | 1,45    |
| Прочность, ГПа               |          | 3,2÷3,5 | 3,8÷4,5 | 4,5÷5,5 | 3,0÷3,5 |
| Модуль упругости, ГПа        |          | 90÷100  | 110÷130 | 140÷160 | 80÷90   |
| Удлинение при разрыве, %     |          | 3,0÷3,5 | 2,5÷3,0 | 2,0÷2,5 | 3,5÷4,0 |

**Символы «||» и «┘»** в таблице 3 указывают на уровень проводимости **вдоль и поперек направления ориентации углеродных волокон соответственно**. Это важные параметры, отражающие выраженную анизотропию углеродных волокон. Удельное

сопротивление вдоль волокон снижается от  $1,5 \times 10^{-3}$  Ом·см у стандартных марок до  $5 \times 10^{-4}$  Ом·см у ультравысокомодульных волокон, что соответствует увеличению электропроводности от 670 до 2500 см/м и говорит о ярко выраженной анизотропии.

Характеристика свойств различных видов углеродных волокон Таблица 3

| Марка и вид волокна / №-свойство                                            | УКН-500 стандартное              | УКН-2500 высокопрочное           | ВМН-4 высоко модульное           | ЛУМ-1 ультравысоко модульное     |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1- Плотность, г/см <sup>3</sup>                                             | 1,75÷1,80                        | 1,78÷1,82                        | 1,80÷1,85                        | 1,85÷2,0                         |
| 2-Прочность на разрыв, ГПа                                                  | 3,0÷4,0                          | 4,5÷7,0                          | 3,5÷4,5                          | 2,5÷3,5                          |
| 3-Модуль упругости, ГПа                                                     | 200÷250                          | 230÷300                          | 350÷500                          | 500÷900                          |
| 4-Удлинение при разрыве, %                                                  | 1,5÷2,0                          | 1,8÷2,5                          | 0,7÷1,2                          | 0,4÷0,7                          |
| 5-Коэффициент теплового расширения $\parallel$ , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | -0,5÷0,5                         | -0,5÷0,5                         | -0,5÷0,5                         | -0,5÷0,5                         |
| 6-Теплопроводность $\parallel$ , Вт/м·К                                     | 5÷15                             | 10÷20                            | 50÷100                           | 200÷1000                         |
| 7-Электропроводность, см/м                                                  | $5 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^5$ | $5 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^5$ | $2 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^5$ |
| 8-Температура эксплуатации, $^{\circ}\text{C}$                              | До 400                           | До 400                           | До 400                           | До 400                           |

Наличие восьми свойств у углепластиков затрудняет выбор оптимального варианта материала, однако такая задача решается путем дальнейшего анализа свойств. Так, свойства 5 (**коэффициент теплового расширения**) и 8 (**температура эксплуатации**) примерно равны для всех марок углепластиков, поэтому они исключаются из дальнейшего анализа. Поскольку свойство 1 (плотность) всех типов волокон остается в относительно узком диапазоне  $1,76 \div 1,97$  г/см<sup>3</sup> и обеспечивает хорошие удельные характеристики, то его также исключаем из рассмотрения.

Налагая на оставшиеся варианты БКП в виде прочности на разрыв, что исключает высококомодульные волокна марок ВМН-4 и ЛУМ-1 из дальнейшего рассмотрения.

**Второй этап оптимизации** идет по таблице 4, в которой остаются высокопрочные марки УКН-500 и УКН-2500, в нее не включили свойство 7 (**электропроводность**) из таблицы 3, ибо оно одинаково у обоих материалов. Весовые коэффициенты  $\varphi_i$  свойств выбираемых материалов, приведенные в таблице 4, и есть условные (субъективные) критерии предпочтения, их значения выбраны из опыта эксплуатации, хотя могут определяться на основе опроса экспертов-специалистов в своей области.

**Точечная оценка КПК** проводится на основе среднеарифметических значений (матожиданий)  $q_{\text{ср}}$  свойств в таблице 4.

Характеристика свойств высокопрочных углеродных волокон Таблица 4

| ПАРАМЕТРЫ<br>СВОЙСТВО        | единица измерения | значимость параметра $\varphi_i$ | $q_{\text{imin}} \div q_{\text{imax}} / \text{матожидание } q_{\text{ср}}$ |                |
|------------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------|
|                              |                   |                                  | УКН-500                                                                    | УКН-2500       |
| Прочность на разрыв          | ГПа               | 0,4                              | 3,0÷4,0 / 3,5                                                              | 4,5÷7,0 / 5,75 |
| Модуль упругости             | ГПа               | 0,3                              | 200÷250 / 225                                                              | 230÷300 / 265  |
| Удлинение при разрыве        | %                 | 0,1                              | 1,5÷2,0 / 1,75                                                             | 1,8÷2,5 / 2,15 |
| Теплопроводность $\parallel$ | Вт/м·К            | 0,2                              | 5÷15 / 10                                                                  | 10÷20 / 15     |

После нормировки свойств относительно наибольшего матожидания в строках 1, 2, 4 таблицы 4, кроме свойства в строке 4, которое нормируется относительно наименьшего значения, и подстановки в (1) получим КПК:

$$Q_{500} = Q_1 = 0,4 \cdot 3,5/5,75 + 0,3 \cdot 225/265 + 0,1 \cdot 1,75/1,75 + 0,2 \cdot 10/15 = 0,72; \quad (2)$$

$$Q_{2500} = Q_2 = 0,4 \cdot 5,75/5,75 + 0,3 \cdot 265/265 + 0,1 \cdot 1,75/2,15 + 0,2 \cdot 15/15 = 0,98; \quad (3)$$

откуда следует, что  $Q_2 - Q_1 = 0,26$  обеспечивает превосходство УКН-2500 над УКН-500 по комплексному показателю качества.

**Диапазонная оценка КПК** предполагает учет изменения свойств материалов от  $q_{\text{imin}}$  до  $q_{\text{imax}}$  с последующим расчетом КПК по минимаксному методу, поэтому вместо (2) получим

$$Q1_{\text{max}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i a_{i\text{max}}^* = 0,4 \cdot 4/7 + 0,3 \cdot 250/300 + 0,1 \cdot 2/2 + 0,2 \cdot 15/20 = 0,729; \quad (4a)$$

$$Q1_{\text{min}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i a_{i\text{min}}^* = 0,4 \cdot 3/4,5 + 0,3 \cdot 200/230 + 0,1 \cdot 1,5/1,8 + 0,2 \cdot 5/10 = 0,727. \quad (4б)$$

Вместо (3) получим

$$Q2_{\text{max}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i a_{i\text{max}}^* = 0,4 \cdot 7/7 + 0,3 \cdot 300/300 + 0,1 \cdot 2/2,5 + 0,2 \cdot 20/20 = 0,98 \quad (5a)$$

$$Q2_{\text{min}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i a_{i\text{min}}^* = 0,4 \cdot 4,5/4,5 + 0,3 \cdot 230/230 + 0,1 \cdot 1,5/1,8 + 0,2 \cdot 10/10 = 0,983 \quad (5б)$$

Сопоставление (4) и (5) с (2) и (3) показывает, что диапазонность свойств мало сказывается на КПК, ибо минимальная разница  $Q2_{\text{max}} - Q1_{\text{min}} = 0,253$  хотя и стала меньше, но не критично, поэтому превосходство УКН-2500 над УКН-500

остается. **Интервальная оценка КПК** необходима для оценки субъективности принятых решений и для анализа робастности полученного решения относительно весовых коэффициентов, для чего необходима вариация  $\varphi_i$  в соотношениях (4) и (5). Выбраны для вариации были первые два показателя  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , потому, что их влияние преобладающее. Чтобы выполнить условие нормировки, расчеты проведены для

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 0,7 \quad (6)$$

при изменении  $\varphi_1$  от 0,3 до 0,4, что обеспечивало синхронное изменение  $\varphi_2$  от 0,4 до 0,3, т.е. уменьшение/увеличение одного весового коэффициента по отношению другому. В этом случае формулы для расчета (2) и (3) примут вид:

$$Q_1 = \varphi_1 \cdot 3.5/5.75 + \varphi_2 \cdot 225/265 + 0.1 \cdot 1.75/1.75 + 0.2 \cdot 10/15 = 0.608\varphi_1 + 0.849\varphi_2 + 0.233; \quad (7)$$

$$Q_2 = \varphi_1 \cdot 5.75/5.75 + \varphi_2 \cdot 265/265 + 0.1 \cdot 1.75/2.15 + 0.2 \cdot 15/15 = \varphi_1 + \varphi_2 + 0.281 = 0.981. \quad (8)$$

Формула (7) с учетом (6) примет вид:

$$Q_1 = 0.241 \varphi_2 + 0.65. \quad (9)$$

Графики, построенные согласно (8) и (9), приведены на рисунке 1. откуда видно, что при  $\varphi_2 = 0.4$  КПК  $Q_1 = 0.75$ , поэтому  $Q_2 - Q_1 = 0.231$ , что тоже не критично, поэтому превосходство УКН-2500 над УКН-500 остается.

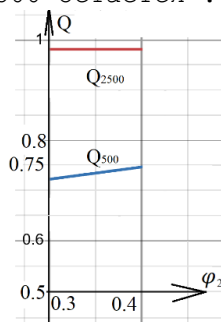


Рисунок 1 – Интервальная оценка КПК от значимости параметра  $\varphi_2$

Вывод: лучшим материалом для изготовления антенн является углепластик УКН-2500, который удовлетворяет всем условиям эксплуатации по электро- и физическим характеристикам.

Перспективы дальнейших исследований в направлении использования композитов в антеннах связаны с созданием адаптивных материалов на основе «умных» композитных материалов, свойства которых могут изменяться под внешним воздействием [9]. Это открывает новые горизонты для разработки антенн с перестраиваемыми характеристиками, способных динамически адаптироваться к изменяющимся условиям работы. Все вышеизложенное приведет к тому, что и результаты выбора также потребуют перерасчета. В рамках улучшенной методики возможно решение задачи синтеза, когда под заданные КПК и  $\varphi_i$  формулируются требования к свойствам композита, что требует отдельного исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуткин, Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. – М.: Радио и связь, 1986. – 289с.
2. Гришко А.К., Нефедьев Д.И., Юрков Н.К. Структурная оптимизация проектных решений в условиях многокритериальности и неопределенности //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2-х томах.-Пенза, ПГУ, 2019. – Т.2.- с.319-322
3. Кузнецов А.С. Методика повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования. / Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. –М.: МАИ (НИУ), 2024.-131с.
4. Сулима А.А.,Комяков А., Ямпурин Н.П.. Методологические основы выбора направления проектирования бортовых комплексов связи // Проектирование и технология электронных средств. – 2025, №2. – с.14-19.
5. Борисов, В.Ф. Конструирование электронных средств: учебное пособие /В.Ф. Борисов [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева- Нижний Новгород, 2013. – 111 с.
6. Абрамов О.В. Использование минимаксного гарантирующего подхода в задачах планирования эксплуатации технических систем // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», в 2-х томах/ Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2024, т. №1.- с.59-61.
7. Миронов, В.Л. Композитные материалы в антенной технике / В.Л. Миронов, Д.М. Сазонов. – Москва: Техносфера, 2020. – 280 с.
8. Мельничук А.И., Горячев В.Н., Юрков Н.К. Автоматизированное проектирование антенны Вивальди для сверхширокополосного электромагнитного импульсного излучения // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», в 2-х томах/ Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2021, т. №2.- с.78-91. doi :10.21685/2307-4205-2021-2-8.
9. Доклады секции перспективных углеродных материалов и технологий .Труды 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 31 марта-5 апреля 2025 г. Электроника, фотоника и молекулярная физика. – М: Физматкнига, 2025. – с.40-59

УДК 621.828

**Ключников<sup>1</sup> А. В.**

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

<sup>1</sup> a.klyuchnikov@bk.ru

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭТАЛОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МАССО-ИНЕРЦИОННОЙ АСИММЕТРИИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ БАЛАНСИРОВОЧНОГО СТЕНДА**

**Аннотация.** Рассмотрена методика моделирования эталонных параметров массо-инерционной асимметрии в заданных диапазонах измерений. Методика предназначена для периодического тестирования и оценки качества функционирования динамического балансировочного стенда. Моделирование указанных параметров выполняют с использованием рабочего эталона, представляющего собой массогабаритный макет балансируемого на стенде тела, и калиброванных контрольных грузов.

**Ключевые слова:** динамическая балансировка, балансировочный стенд, массо-центровочные характеристики, массо-инерционные характеристики, рабочий эталон, калиброванный груз, погрешность измерений

**Klyuchnikov<sup>1</sup> A. V.**

<sup>1</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia

<sup>1</sup> a.klyuchnikov@bk.ru

## **MODELING THE REFERENCE PARAMETERS OF MASS-INERTIA ASYMMETRY FOR TESTING THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF BALANCING STAND**

**Abstract.** A procedure for modeling reference parameters of mass-inertia asymmetry in the specified measurement ranges is analyzed. The procedure is intended for periodical testing and assessing of the performance of a dynamic balancing stand. The reference parameters are simulated with use of a working standard in the form of mass-dimensional model of a stand-balanced body, and calibrated control weights.

**Keywords:** dynamic balancing, balancing stand, mass-centering characteristics, mass-inertia characteristics, working standard, calibrated weight, measurement error

### **Введение**

Обязательной операцией на заключительном этапе общей сборки при изготовлении сложного осесимметричного тела вращения (ротора), имеющего в своем составе рамы, отсеки, геодезическую аппаратуру и т.п., на заключительном этапе общей сборки является экспериментальный контроль не только массо-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ), таких как масса, координаты центра масс, моменты инерции, но также параметров массо-инерционной асимметрии (к числу которых относится смещение центра масс с геометрической оси тела и перекося продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) относительно той же оси) с целью совмещения продольной ГЦОИ с геометрической осью в ходе последующей (при необходимости) балансировки. Для определения массы ротора обычно используют стандартные весы. Балансировку серийных роторов выполняют на балансировочных станках (стендах), реализующих статические или динамические (в зависимости от требований к точности балансировки) методы уравнивания. Контроль МЦИХ, в том числе параметров массо-инерционной асимметрии безопорных и нестандартных роторов обычно выполняют с использованием специализированных контрольно-измерительных стендов, учитывающих конструктивные особенности объекта контроля [1–3]. Следует отметить, что в последнее время для определения параметров массо-инерционной асимметрии безопорных роторных объектов, номинальные значения которых обычно весьма близки к нулю, намечается тенденция к использованию динамических балансировочных стендов обладающих высокой точностью и производительностью.

Очевидно, что после выбора измерительного стенда точность определения МЦИХ и особенно параметров массо-инерционной асимметрии, в значительной степени определяется метрологическими характеристиками используемых стендов.

Критерием оценки точности функционирования стендов, как правило, является соответствие их нормируемых технических характеристик заданным нормативам точности в требуемых диапазонах измерений. Поскольку задача разработки комплексного способа проверки (контроля) качества функционирования контрольно-измерительных стендов, особенно стендов, предназначенных для контроля МЦИХ безопорных роторов, не нашла отражения в технической литературе [1, 2, 4–6] и других источниках, это делает её решение актуальным для конструкторов при проектировании стендов. Основной трудностью при оценке качества функционирования стенда зачастую становится отсутствие эталонов и средств измерений, сопоставимых по точности и диапазонам контролируемых характеристик.

Как правило, для проведения работ по тестированию нормируемых технических характеристик стенда при его аттестации на предмет возможности использования

для балансировки конкретного типа роторов, стенд оснащается специализированными рабочими эталонами, каждый из которых представляет собой габаритно-массовый макет (имитатор) контролируемого ротора соответствующего типа. Эталоны, обычно, изготавливаются из простых составных частей (кольцо, цилиндр, конус и т.п.), выполненных из металла, что позволяет рассчитать их МЦИХ с высокой точностью. Также рабочие эталоны имеют базовые посадочные поверхности, идентичные посадочным поверхностям соответствующих контролируемых роторов.

Однако каждый рабочий эталон обладает единственным набором МЦИХ, в том числе параметров массо-инерционной асимметрии, что не позволяет исследовать характеристики точности балансировочного стенда и достоверно (на основании экспериментальных данных) подтверждать качество функционирования стенда в заданных диапазонах измерений каждого из контролируемых параметров. А изготовление для каждого типа роторов набора из нескольких эталонов, обладающих требуемой формой и посадочными поверхностями, но при этом имеющих различные наборы МЦИХ, позволяющих исследовать характеристики точности стенда в заданных диапазонах, и последующая паспортизация каждого эталона из данного набора, является технически сложной и весьма дорогостоящей задачей. Поэтому в процессе контроля характеристик точности стенда обычно определяют значения МЦИХ и параметров массо-инерционной асимметрии эталона, устанавливаемого на стенде, и сравнивают их с известными номинальными (паспортными) значениями МЦИХ эталона. По результатам сравнения судят о погрешностях измерений, которые распространяют на все диапазоны измерений соответствующих параметров. Такой подход может приводить к появлению не выявленных дополнительных методических погрешностей измерений.

Очевидно, что разработка простого, надёжного и информативного способа контроля метрологических характеристик стендов в заданных диапазонах измерений является важной задачей. Решением поставленной задачи представляется применение метода натурного моделирования эталонных параметров в заданных диапазонах (в первую очередь, близких к нулю значений параметров массо-инерционной асимметрии) с использованием имеющегося рабочего эталона и, например, контрольных грузов, массы которых известны с высокой точностью, прикрепляемых к эталону.

Моделирование эталонных параметров

В работах [7–9] приведено описание конструкции и принципа действия вертикального динамического балансировочного стенда с жесткими газовыми опорами, выполненными в виде конических газостатических подшипников (ГСП), спроектированного для прецизионной балансировки безопорных роторов конической формы.

В ходе балансировочного эксперимента балансируемый объект загружается на ГСП в вертикальном положении, что практически исключает его деформации под воздействием сил тяжести. С помощью пневматического привода обеспечивается разгон ротора и его вращение с заданной постоянной (рабочей) угловой скоростью вокруг геометрической оси. Измеряют вибрации ГСП. Расчет параметров радиуса-вектора поперечного смещения центра масс и вектора-угла перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ротора проводится по результатам определения значений и фазовых углов дисбалансов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ , действующих в верхней и нижней (далее обозначаемых соответственно индексами «в» и «н») плоскостях коррекции, и пропорциональных амплитудам и фазам вибраций газовых опор, с использованием выражений [4, 5]:

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{B} + \vec{H}}{M}; \quad (1)$$

$$\vec{\gamma} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\vec{B}x_B + \vec{H}x_H)}{I_3 - I_a}, \quad (2)$$

где значения дисбалансов определяются выражениями

$$\vec{B} = m_B \vec{r}_B; \quad (3)$$

$$\vec{H} = m_H \vec{r}_H. \quad (4)$$

В (1)–(4):  $M$  – масса балансируемого объекта,  $I_3$  и  $I_a$  – соответственно экваториальный и аксиальный моменты инерции ротора,  $x_B$  и  $x_H$  – соответственно расстояния от центра масс до верхней и нижней плоскостей коррекции,  $m_B$  и  $m_H$  – точечные неуравновешенные массы, расположенные соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции на радиусах  $r_B$  и  $r_H$ . При этом фазовые углы дисбалансов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  будут совпадать с углами неуравновешенных точечных масс в соответствующих плоскостях коррекции. Значения параметров  $M$ ,  $I_3$ ,  $I_a$ ,  $x_B$ ,  $x_H$ ,  $r_B$  и  $r_H$ , должны быть определены заранее, до начала балансировочного эксперимента (с использованием другого стендового оборудования и других средств измерений). Знак «плюс» в (2) ставится, если угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  острый, а знак минус – при тупом угле.

Для проведения периодических проверок характеристик точности стенда, в его состав входит рабочий эталон, выполненный в виде усеченного конуса [7–9]. Эталон обладает единственным набором МЦИХ, известных с высокой точностью. Поэтому для обеспечения возможности тестирования характеристик точности стенда в заданных диапазонах измерений параметров массо-инерционной асимметрии, рабочий эталон был доработан путем создания на его противоположных торцах плоскостей коррекции дисбалансов. [10]. Плоскости коррекции выполнены следующим образом: на каждом из торцов эталона, на известных расстояниях  $r_B$  и  $r_H$  от его центра, равномерно по окружности (в известных угловых положениях  $\varphi_B$  и  $\varphi_H$ ) в соответствии с рисунком 1 выполнены резьбовые отверстия, предназначенные для прикрепления калиброванных контрольных грузов – эталонных масс  $m^{\circ}$ . Контрольные грузы выполнены в виде резьбовых втулок и также входят в состав балансировочного стенда.

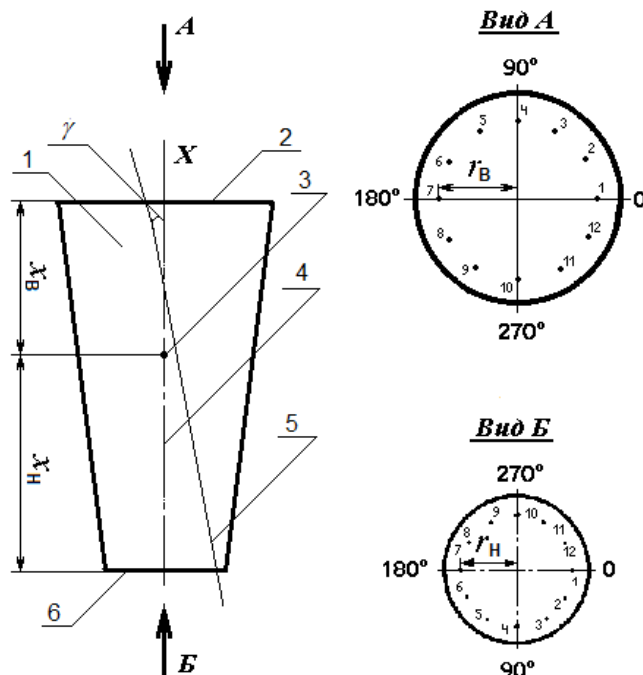


Рисунок 1 – Вид рабочего эталона:

1 – корпус; 2 – верхняя плоскость коррекции; 3 – центр масс;  
4 – геометрическая ось; 5 – ГЦОИ; 6 – нижняя плоскость коррекции

При использовании рабочего эталона массой  $M^{\circ}$  и контрольных грузов, прикрепляемых к верхней и/или нижней плоскостям коррекции, выражения для расчета моделируемых значений эталонных параметров радиуса-вектора поперечного смещения центра масс и вектора-угла перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси рабочего эталона, с учетом (1)–(4) могут быть записаны следующим образом:

$$\vec{\rho}^{\circ} = \frac{\sum m_B^{\circ} \vec{r}_B + \sum m_H^{\circ} \vec{r}_H}{M^{\circ}}; \quad (5)$$

$$\vec{\gamma}^{\circ} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\sum m_B^{\circ} \vec{r}_B \times \vec{r}_H + \sum m_H^{\circ} \vec{r}_H \times \vec{r}_B)}{I_a^{\circ} - I_a^{\circ}}. \quad (6)$$

Установка в различные угловые положения на плоскостях коррекции, выполненных на торцах рабочего эталона, различных по массе контрольных грузов в различных их сочетании обеспечивает возможность задания (моделирования) практически бесконечного числа различных вариаций эталонных значений параметров массо-инерционной асимметрии.

В процессе контроля характеристик точности балансировочного стенда:

- прикреплении контрольных грузов к рабочему эталону моделируют требуемые значения параметров массо-инерционной асимметрии;
- по методике измерений выполняют настройку измерительной системы стенда и определяют значения контролируемых параметров [8, 11];
- по результатам сравнения измеренных значений с соответствующими смоделированными – определяют погрешности измерений и судят о точности функционирования балансировочного стенда.

Закключение

Предложенный способ информативен и надёжен, позволяет многократно тестировать характеристики точности стенда в заданных диапазонах измерений параметров массо-инерционной асимметрии с определенной периодичностью и, следовательно,

объективно оценивать качество функционирования стенда в течение всего срока его эксплуатации. При этом выполнение данной работы обеспечивается с использованием единственного рабочего эталона, без его замены.

Предложенный метод может быть полезен разработчикам и исследователям для оценки качества функционирования балансировочных стендов, реализующих также статические и маятниковые методы измерений [12, 13].

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ключников А.В., Васильев М.А., Патокина Н.Е., Абышев Н.А., Криковцов Д.А. Конструкции и пути совершенствования систем контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2018. №3. С. 105–114.
2. Ключников А.В., Абышев Н.А. К вопросу оптимизации выбора стендового оборудования, используемого для уравнивания летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». №3. С. 77–85.
3. Ключников А.В., Абышев Н.А. Обзор российских патентов по направлению экспериментального определения массо-центровочных и инерционных характеристик беспилотных летательных аппаратов // Труды XXIV международного симпозиума «Надежность и качество». 2019. Т.1. С. 149–155.
4. Основы балансировочной техники. Т.1. Уравнивание жестких роторов и механизмов / Под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 527 с.
5. Левит М.Е., Рыженков В.М. Балансировка деталей и узлов. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
6. Гернет М.М., Ратобылский В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1969. – 247 с.
7. Ключников А.В. Конструктивный облик стенда для прецизионного определения параметров массо-инерционной асимметрии длинномерных тел методом динамической балансировки // Надежность и качество сложных систем. 2023. №1. С. 106–117.
8. Ключников А.В. Совершенствование методики одноплоскостной балансировки длинномерного тела в динамическом режиме // Труды XXIX международного симпозиума «Надежность и качество». 2024. Т. 2. С. 259–262.
9. Пат. №2292533 МПК G01M 1/02, Россия. Балансировочный стенд с вертикальной осью вращения: / Л.М. Глазырина, М.С. Карповицкий, А.В. Ключников, А.И. Мальгин, Г.Г. Смирнов, Ю.П. Фомин // Заявл. 27.04.2004, опубл. 27.01.2007; Бюл. №3.
10. Пат. №2434212 МПК G01M 1/04, Россия. Способ проверки качества функционирования низкочастотного динамического балансировочного стенда / А.В. Ключников, Ю.П. Фомин // Заявл. 24.02.2010, опубл. 20.11.2011; Бюл. №32.
11. Ключников А.В. Методы обеспечения помехоустойчивости измерительной системы динамического балансировочного стенда с газовыми опорами // Труды XXX международного симпозиума «Надежность и качество». 2025. Т. 2. – С. 202–208.
12. Пат. №2445592 МПК G01M 1/10, Россия. Способ проверки качества функционирования стенда для определения массо-центровочных и массо-инерционных характеристик твёрдого тела вращения / А.В. Ключников // Заявл. 30.06.2010, опубл. 20.03.2012; Бюл. №8.
13. Пат. №201170 МПК G01M 1/10, Россия. Рабочий эталон контрольно-измерительного стенда для моделирования массо-центровочных и инерционных характеристик контролируемого объекта / А.В. Ключников // Заявл. 13.01.2020, опубл. 01.12.2020; Бюл. №34.



УДК 621.382

**Зайцев<sup>1</sup> С.А., Фролов<sup>2</sup> И.В., Сергеев<sup>3</sup> В.А., Радаев<sup>4</sup> О.А.**

<sup>1</sup> Ульяновское конструкторское бюро приборостроения, Ульяновск, Россия

<sup>2,3,4</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Ульяновск, Россия

<sup>2,3</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

<sup>1</sup> s.zaytsev@ukbp.ru

<sup>2</sup> ilya-frolov88@mail.ru

## **ОТБРАКОВКА СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ ПО ОТНОШЕНИЮ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЙ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Аннотация.** Установлено, что отношение потока излучения видимого диапазона (380–760 нм) к потоку излучения ближнего инфракрасного диапазона (760–900 нм) спектра излучения белых светодиодных матриц является температурозависимым параметром. Показана эффективность применения этого отношения для отбраковки светодиодных матриц, склонных к ускоренной деградации, по результатам ускоренных испытаний в условиях повышенной температуры, в режиме электротермоциклирования при воздействии вибрации и без ее воздействия. Показано, что деградационные процессы, протекающие в светодиодных матрицах, следует рассматривать как комплексные процессы изменений параметров системы «кристалл – люминофор».

**Ключевые слова:** светодиодная матрица, испытания, ближний инфракрасный спектр излучения, световой поток, поток излучения, деградация характеристик

**Zaitsev<sup>1</sup> S.A., Frolov<sup>2</sup> I.V., Sergeev<sup>3</sup> V.A., Radaev<sup>4</sup> O.A.**

<sup>1</sup> Ulyanovsk Design Bureau of Instrument Engineering, Ulyanovsk, Russia

<sup>2,3,4</sup> Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia

<sup>2,3</sup> Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

<sup>1</sup> s.zaytsev@ukbp.ru

<sup>2</sup> ilya-frolov88@mail.ru

## **CANDIDATE LED MATRICES BASED ON VISIBLE AND NARROW INFRARED RADIATION SPECTRA**

**Abstract.** It has been established that the ratio of the visible range (380–760 nm) to the near-infrared range (760–900 nm) of the white LED array spectrum is a temperature-dependent parameter. The effectiveness of using this ratio for rejecting LED arrays prone to accelerated degradation has been demonstrated based on accelerated tests at elevated temperatures, electrothermal cycling, and vibration. It has been shown that the degradation processes occurring in light-diode matrices should be considered as complex processes of changes in the parameters of the crystal-phosphor system.

**Keywords:** LED matrix, testing, near-infrared radiation spectrum, luminous flux, radiation flux, degradation of characteristics

### **Введение**

В настоящее время одним из основных направлений развития светодиодной отрасли является снижение отказов и увеличение срока службы до уровня, соответствующего полному ресурсу изделия. Температура является фактором, ускоряющим деградационные физико-химические процессы, протекающие в структуре светоизлучающих кристаллов матриц, люминофоре и первичной оптике – линзе [1–0]. Следствием деградационных процессов является системное изменение светотехнических параметров матриц [0]. Так деградация может приводить не только к снижению светового потока, но и к изменению цветности, росту теплового сопротивления и др. Для светодиодных матриц, используемых в составе бортового светотехнического оборудования, крайне важно обеспечить полный, рациональный и достоверный контроль их качества, оценить соответствие их параметров требованиям нормативно-технической документации, а также дать прогноз по обеспечению безотказной работы при эксплуатации изделия.

Для контроля качества светодиодных матриц существуют различные методы, в том, числе, по пороговому току [0], по ватт-амперным и вольт-амперным, тепловым характеристикам [0–9] и др. В работе [10] показано, что для белых светодиодных матриц отношение световых потоков в видимой и ближней инфракрасной (БИК) области спектра излучения зависит от температуры и коррелирует с величиной спада светового потока матриц в процессе испытаний. Цель работы состояла в оценке эффективности отбраковки светодиодных матриц по отношению потоков излучений видимого и БИК диапазонов спектра излучения.

Исследование зависимости отношения потоков излучений видимого и БИК диапазонов спектра излучения от температуры и тока

Исследованы светодиодные матрицы типа GW P9LT31.EM-PSPU-XX55-1 Osram белого свечения. Матрицы состоят из 8 последовательно соединенных кристаллов, размещенных в корпусе и покрытых слоем люминофора.

Исследованы зависимости светового потока излучения матриц на разных участках спектра излучения: в видимом диапазоне от 400 до 680 нм и БИК диапазоне от 680 до 900 нм. Измерения проводились при помощи спектро радиометра OL770.

Определено, что при увеличении температуры активной области белых светодиодных матриц за счет выделения разогревающей мощности и/или повышения температуры окружающей среды, происходит уменьшение светового потока видимой части спектра излучения и изменение потока излучения БИК диапазона. При этом характер изменения потока излучения БИК диапазона отличается от характера изменения потока излучения видимого диапазона спектра. На рисунке 1 приведены спектры излучения светодиодной матрицы при разных условиях: линия 1 показывает спектр излучения при номинальном токе 200 мА и нормальной климатической температуре +22 °С; линия 2 показывает спектр излучения светодиодной матрицы при номинальном токе и при повышенной температуре окружающей среды +120 °С; линия 3 показывает спектр излучения светодиодной матрицы при токе потребления 130 мА и нормальной климатической температуре +22 °С.

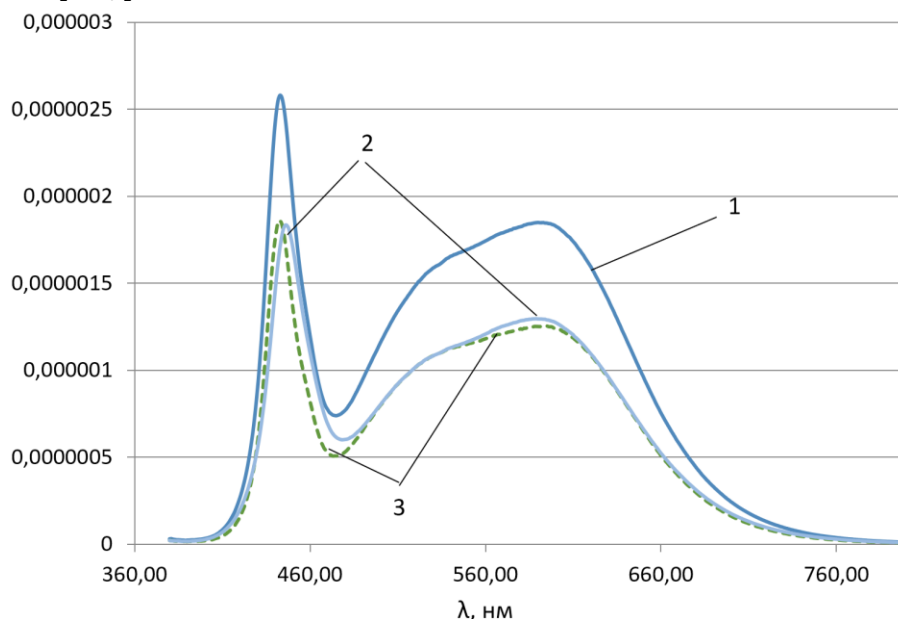


Рисунок 1 - Спектры излучения светодиодной матрицы

Уровни, на которые производилось снижение тока потребления и повышение температуры окружающей среды, подбирались опытным путем, чтобы значение полученного светового потока составляло 70% процентов от первоначального при номинальном токе и температуре, равной нормальной климатической +22 °С.

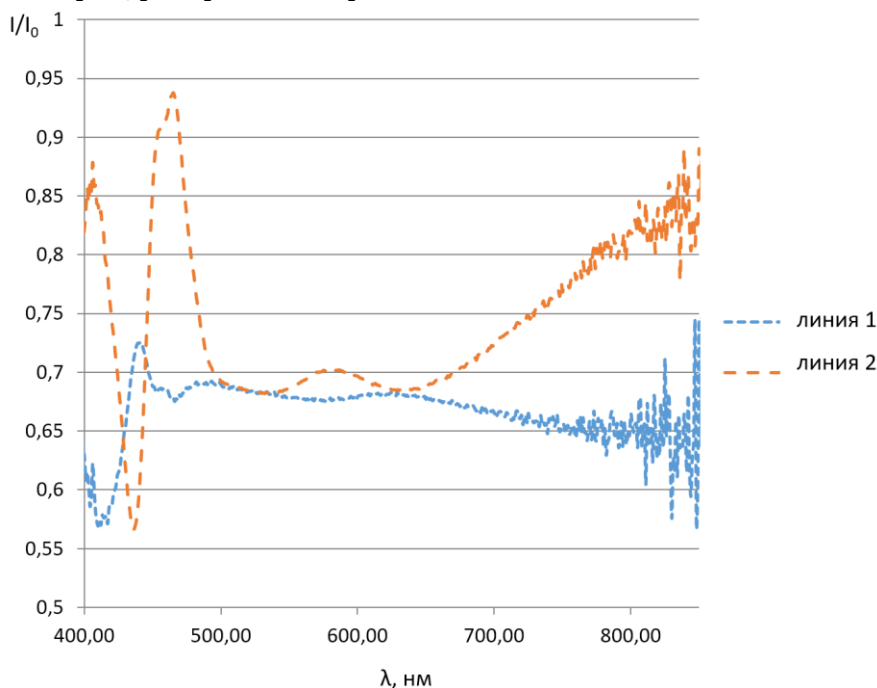


Рисунок 2 - Отношения спектров излучения со сниженным световым потоком за счет снижения тока и повышения температуры к первоначальному спектру

На рисунке 2 приведены диаграммы отношения радиометрической интенсивности излучения при номинальном токе и повышенной температуре 120 °С к значениям интенсивности излучения при номинальном токе и нормальной температуре (линия 1) и отношения радиометрической интенсивности излучения при пониженном токе 130 мА и нормальной температуре к интенсивности излучения при номинальном токе и нормальной температуре (линия 2).

Из приведенных диаграмм видно различие в механизмах снижения светового потока при уменьшении тока и повышении температуры. Так при снижении тока наблюдается небольшое смещение спектра излучения кристалла в коротковолновую область за счет незначительного снижения температуры кристалла, при этом область спектра излучения люминофора практически равномерно снижается во всем диапазоне. На длинноволновом участке спектра более 700 нм наблюдается более выраженное снижение интенсивности излучения.

При увеличении температуры окружающей среды происходит сдвиг диапазона спектра, отвечающего за излучение синего кристалла, в длинноволновую область, так называемое «красное» смещение [11] (линия 2). Также происходит более выраженное, чем на первой кривой, изменение участка спектра, лежащего в БИК диапазоне на участке от 680 до 900 нм.

Таким обзором для белых светодиодных матриц характерно то, что чем выше температура активной области светодиода и люминофора, тем больший вклад в общий энергетический поток излучения вносит участок спектра, лежащий в диапазоне длин волн от 680 до 900 нм. При этом отношение потока излучения видимого диапазона к потоку излучения БИК диапазона при изменении тока и постоянной температуре окружающей среды остается практически постоянным.

Введем параметр, определяющий их соотношение:

$$K_Z = \frac{\int_{380}^{760} I(\lambda) d\lambda}{\int_{760}^{900} I(\lambda) d\lambda} = \frac{F_{VIS}}{F_{NIR}} \quad (1)$$

Параметр  $K_Z$  позволяет учитывать изменение светового потока видимой и БИК областей спектра излучения светодиодных матриц в результате их деградации при испытаниях, связанные не только с образованием дефектов активной области кристаллов, но дефектов люминофора [12]. Следовательно, параметр  $K_Z$  может использоваться для отбраковки светодиодных матриц, склонных к ускоренной деградации при испытаниях.

Исследована эффективность отбраковки светодиодных матриц по отношению потоков излучений видимого и БИК диапазонов спектра излучения. В качестве границы значения отбраковочного параметра светодиодных матриц выбиралось отклонение значения  $K_Z$  от среднего на величину среднеквадратическое отклонения  $\sigma_{K_Z}$ . Для этого вычислялось среднее значение  $K_Z$  по выборке светодиодных матриц

$$\bar{K}_Z = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N K_{Zn} \quad (2)$$

и среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_{K_Z} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (K_{Zn} - \bar{K}_Z)^2}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество светодиодных матриц в выборке.

Границы отбраковки определялись по формулам

$$K_{Z_{\text{гpmax}}} = \bar{K}_Z + \sigma_{K_Z} \quad (4)$$

$$K_{Z_{\text{гpmin}}} = \bar{K}_Z - \sigma_{K_Z} \quad (5)$$

Светодиодные матрицы, у которых значения параметра  $K_Z$  превышает  $K_{Z_{\text{гpmax}}}$  или меньше  $K_{Z_{\text{гpmin}}}$ , предположительно имеют большее число дефектов и они будут подвергаться отбраковке.

Для оценки эффективности отбраковки светодиодных матриц по параметру  $K_Z$  была произведена серия испытаний.

Результаты испытаний светодиодных матриц. Испытания №1.

Исследована выборка светодиодных матриц GW P9LT31.EM-PSPU-XX55-1 Osram из 7 штук. Перед испытаниями был произведен расчет параметров по формулам (1-5). Значения приведены в таблице 1.

По полученным оценкам образцы под номерами 2-6 соответствуют критерию годности, а образцы под номерами 1, 7 отбракованы.

Испытания светодиодных матриц проводились по программе, приведенной в таблице 2.

Изменения светового потока светодиодных матриц в процессе ускоренных испытаний относительно начальных значений показаны на рисунке 3.

Значения параметров светодиодных матриц

Таблица 1

| № Светодиодной матрицы | $K_{Tz}$ | Результат отбраковки |
|------------------------|----------|----------------------|
| 1                      | 159,42   | Забракована          |
| 2                      | 160,18   | Годная               |
| 3                      | 161,25   | Годная               |
| 4                      | 161,01   | Годная               |
| 5                      | 161,15   | Годная               |
| 6                      | 161,96   | Годная               |
| 7                      | 163,11   | Забракована          |
| $K_{z_{rmax}}$         | 162,44   |                      |
| $K_{z_{rmin}}$         | 159,84   |                      |
| $\bar{K}_z$            | 161,14   |                      |

Программа ускоренных ресурсных испытаний

Таблица 2

| Номер этапа испытаний                                                 | Температура окружающей среды, °C | Потребляемый ток матрицы, мА | Продолжительность испытаний, ч | Эквивалентное работе в НКУ время работы светодиодных матриц, ч |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1                                                                     | 110                              | 140                          | 120                            | 9600                                                           |
| 2                                                                     | 110                              | 140                          | 144                            | 11520                                                          |
| 3                                                                     | 150                              | 140                          | 24                             | 29760                                                          |
|                                                                       | 130                              | 140                          | 216                            |                                                                |
| 4                                                                     | 130                              | 140                          | 552                            | 60720                                                          |
| Суммарное эквивалентное работе в НКУ время работы светодиодных матриц |                                  |                              |                                | 111600                                                         |

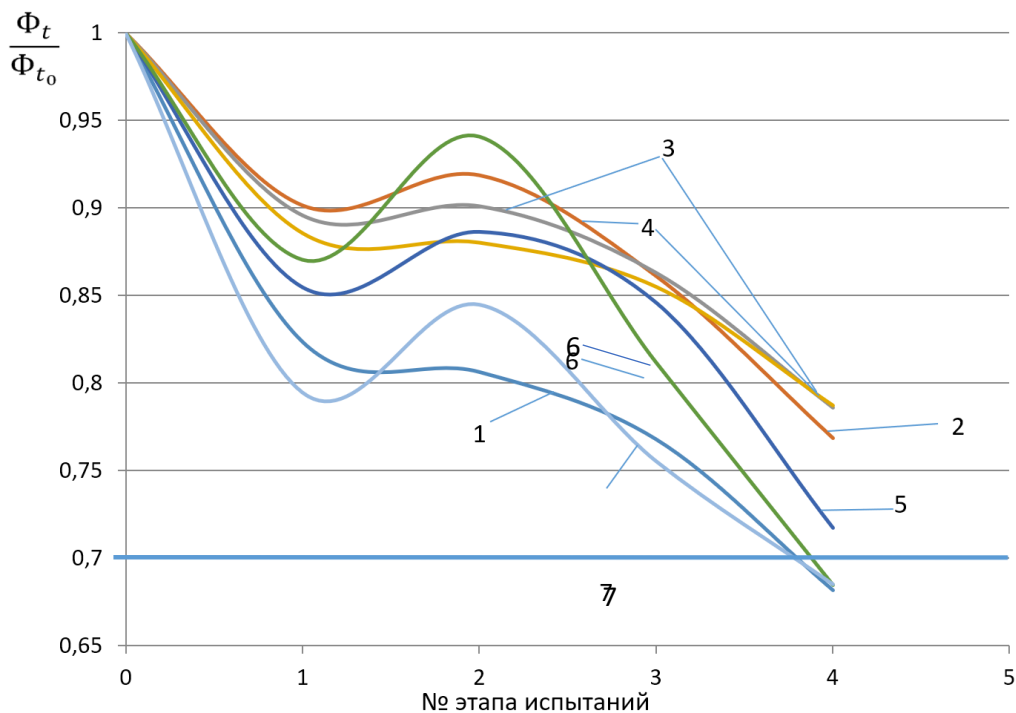


Рисунок 3 – Изменение светового потока светодиодных матриц в процессе ускоренных испытаний

Критерием отказа светодиодных матриц в процессе ускоренных испытаний служит спад светового потока более чем на 30% относительно начального значения. Из рисунка 3 видно, что по окончании 4-го цикла испытаний отказали матрицы 1, 7, 6. Оценки эффективности отбраковки матриц по параметру  $K_z$  приведены в таблице 3.

Результаты отбраковки

Таблица 3

| Параметр                        | Значение       |
|---------------------------------|----------------|
| Коэффициент эффективности       | 2, 3           |
| Ложно забракованных, шт         | 0              |
| Не отбракованные – отказные, шт | 1 (матрица №6) |

Для повышения эффективности отбраковки негодных светодиодных матриц возможно сократить интервал между граничными значениями, то есть использовать отклонение от среднего меньше  $\sigma_{K_Z}$ . Но в этом случае возрастает вероятность отбраковки годного изделия.

Результаты испытаний светодиодных матриц. Испытания №2

Для оценки надежности светодиодных матриц в условиях, имитирующих условия эксплуатации авиационного бортового оборудования, были проведены эквивалентно-циклические испытания. По результатам измерений теплового сопротивления на разработанном в УФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН измерителе теплового импеданса LED-Meter [13] из 60-ти матриц GW P9LR31.EM-PQPS-XX55-1 были отобраны 12 матриц, тепловые сопротивления которых перекрывают диапазон от минимального значения до максимального в пределах исследованной выборки. Минимальное значение теплового сопротивления переход-корпус составляет 1,7 К/Вт, максимальное – 2,7 К/Вт.

Программа проведения испытаний была построена на основе данных ОСТ 1 01204-2012 «Надежность изделий авиационной техники. Эквивалентно-циклические испытания на безотказность авиационного бортового оборудования» [0]. Испытания матриц проводили в течение 16 ч в условиях электро-, термоциклирования и действия вибрации. Длительность одного температурного цикла составляла 4 ч: 1,5 ч температура в испытательной камере поддерживалась на уровне  $T = +115^\circ\text{C}$ , 1,5 ч – на уровне  $T = -60^\circ\text{C}$ , смена температуры происходила в течение 30 мин. Длительность одного электрического цикла составляла 30 мин: в течение 15 мин через матрицы пропускали ток 190 мА, в течение 15 мин матрицы были выключены. Электро- и термоциклирование матриц сопровождалось действием широкополосной вибрации с виброускорением 6,8 г.

Согласно программе испытаний, 16 часовое воздействие изменения температуры от минус 60 до  $+115^\circ\text{C}$  и вибрации эквивалентно 1,5 годам эксплуатации летательного аппарата в естественных условиях эксплуатации [15]. Программа испытаний приведена на рисунке 4. Воздействие вибрации, имитирующей условия полета, может приводить к механическим повреждениям структуры (микротрещины в кристалле, люминофоре или связующем веществе, ухудшение теплового контакта), что потенциально может ускорить деградационные процессы, инициированные термоциклированием.

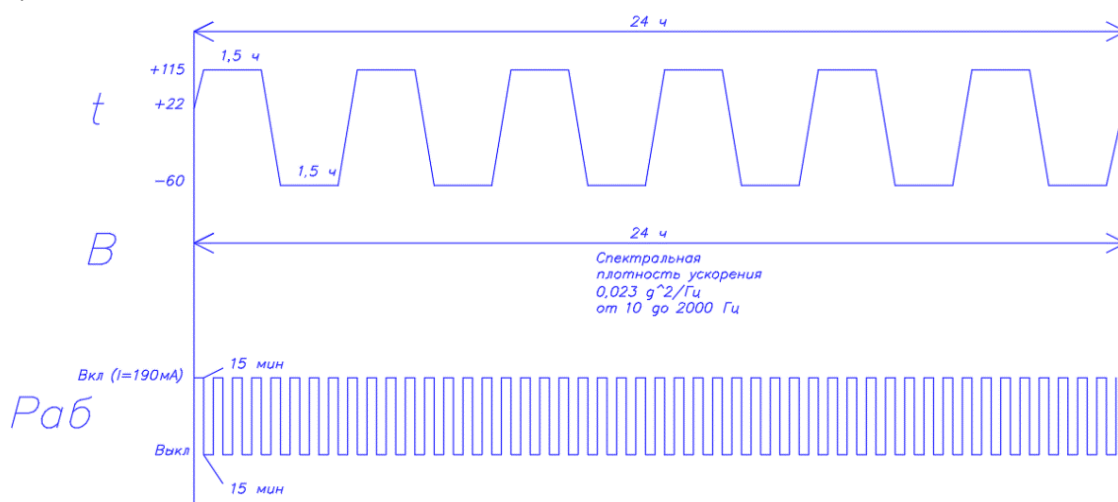


Рисунок 4 – Программа эквивалентно-циклических испытаний

В соответствии с данной программой были проведены испытания двух групп светодиодных матриц по 6 штук в каждой. Первая группа подвергалась полному комплексу воздействий в соответствии с программой испытаний. Вторая группа подвергалась тем же испытаниям, но без воздействия вибрации. Контроль параметров проводился на следующих этапах: до начала испытаний, после 16 ч испытаний.

Перед проведением испытаний у всех 60 матриц был измерен параметр  $K_Z$  и произведена отбраковка в соответствии с формулами (2-5). Результаты рассчитанных отбраковочных параметров приведены в таблице 4.

Отбраковочные параметры

Таблица 4

| Параметр          | Значение |
|-------------------|----------|
| $\sigma_{K_{TZ}}$ | 1,85     |
| $K_{Z_{гpmax}}$   | 244,23   |
| $K_{Z_{гpmin}}$   | 240,52   |

Результаты отбраковки для двух выбранных групп приведены в таблице 5.

Данные по отбракованным матрицам

Таблица 5

| № группы | № светодиодной матрицы | Значение $K_z$ | Соответствие по параметру $K_{z_{грmax}}$ более 244,2 | Соответствие по параметру $K_{z_{грmin}}$ менее 240,5 | Итоговый результат отбраковки |
|----------|------------------------|----------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1        | 7                      | 243.4142       | +                                                     | +                                                     | Годная                        |
|          | 11                     | 239.4298       | +                                                     | -                                                     | Забракована                   |
|          | 13                     | 246.4956       | -                                                     | +                                                     | Забракована                   |
|          | 30                     | 241.3312       | +                                                     | +                                                     | Годная                        |
|          | 37                     | 244.2244       | -                                                     | +                                                     | Забракована                   |
|          | 51                     | 238.9806       | +                                                     | -                                                     | Забракована                   |
| 2        | 19                     | 246.8065       | -                                                     | +                                                     | Забракована                   |
|          | 20                     | 240.9277       | +                                                     | +                                                     | Годная                        |
|          | 29                     | 240.7169       | +                                                     | +                                                     | Годная                        |
|          | 32                     | 242.8316       | +                                                     | +                                                     | Годная                        |
|          | 34                     | 238.9888       | +                                                     | -                                                     | Забракована                   |
|          | 39                     | 241.3781       | +                                                     | +                                                     | Годная                        |

Результаты измерений светотехнических параметров светодиодных матриц первой и второй групп при токе 200 мА приведены соответственно в таблицах 6 и 7.

Результаты измерения параметров 1 группы светодиодных матриц Таблица 6

| № светодиодной матрицы | До испытаний       | После 16 ч испытаний |              |
|------------------------|--------------------|----------------------|--------------|
|                        | Световой поток, лм | Световой поток, лм   | Снижение в % |
| 7                      | 581.1              | 552.6                | 4,90         |
| 11                     | 590.4              | 558.6                | 5,39         |
| 13                     | 590.4              | 561.3                | 4,93         |
| 30                     | 582                | 553.5                | 4,90         |
| 37                     | 583.5              | 550.2                | 5,71         |
| 51                     | 588.9              | 555.6                | 5,65         |

Результаты измерения параметров 2 группы светодиодных матриц Таблица 7

| № светодиодной матрицы | До испытаний       | После 16 ч испытаний |              |
|------------------------|--------------------|----------------------|--------------|
|                        | Световой поток, лм | Световой поток, лм   | Снижение в % |
| 19                     | 578.7              | 543                  | 6.17         |
| 20                     | 582                | 564.6                | 2.99         |
| 29                     | 572.4              | 547.8                | 4.30         |
| 32                     | 578.7              | 552                  | 4.61         |
| 34                     | 591.9              | 565.2                | 4.51         |
| 39                     | 589.5              | 572.4                | 2.90         |

Оценки эффективности отбраковки матриц по параметру  $K_z$  приведены в таблице 8.

Результаты отбраковки

Таблица 8

| Номер группы светодиодных матриц | Параметр                  | Значение        |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------|
| 1                                | Коэффициент эффективности | 1,5             |
|                                  | Ложно забракованный       | 1 (матрица №13) |
|                                  | Не отбракованный отказной | 0               |
| 2                                | Коэффициент эффективности | 3               |
|                                  | Ложно забракованный       | 1 (матрица №34) |
|                                  | Не отбракованный отказной | 0               |

Более высокий коэффициент эффективности (3 против 1,5) для группы 2 (без вибрации) может указывать на то, что в условиях комбинированного воздействия (температура + вибрация) деградационные процессы имеют более стохастический характер, и часть матриц, отбракованных по параметру  $K_z$ , могла иметь дефекты, критичные именно к механическим нагрузкам. Тем не менее, метод в целом показал свою эффективность для предварительной отбраковки потенциально менее надежных образцов (склонных к ускоренной деградациии).

Коэффициент корреляции между параметром  $K_z$  и спадом светового потока составил 0,7 для первой и 0,66 для второй групп светодиодных матриц.

Заключение

В результате исследований установлено, что параметр  $K_z$ , определяемый как отношение светового потока излучения в видимой области спектра к потоку

излучения БИК диапазона спектра, является температурозависимым параметром для системы «кристалл-люминофор» белых светодиодных матриц. Экспериментально подтверждена его высокая корреляция с величиной спада светового потока в процессе ускоренных испытаний под действием повышенной температуры, термоциклирования, токовой нагрузки и вибрации. Использование этого параметра позволяет без проведения длительных ресурсных испытаний выявлять образцы, склонные к ускоренной деградации. Это открывает возможности для повышения надежности светотехнических изделий авиакосмического и специального назначения путем использования в их составе предварительно отобранных светодиодных матриц.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходаков А.М., Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А., Зайцев С.А. Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в светодиодных матрицах // Известия вузов. Электроника. – 2024. – №29(6). – С. 752-762.
2. В. Сушков, С. Никифоров. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN // Полупроводниковая светотехника №3'2011/
3. Кузьменко, В. П., Шишлаков, В. Ф., Солёный, С. В., Квас, Е. С., & Солёная, О. Я. (2019). Исследовательские испытания светодиодных источников света. Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 62(7), 632-640.
4. Гурский А. Л., Дерябина М. Ю., Машедо Н. В. Влияние внешних факторов на параметры светодиодных ламп, измеряемые в процессе их испытаний. – 2023.
5. Фролов И.В., Сергеев В.А., Ходаков А.М., Зайцев С.А. Исследование изменений характеристик светодиодных матриц бортового светильника при токовых испытаниях. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №8.
6. Радаев О. А., Фролов И. В., Зайцев С. А., Сергеев В. А. Измерения порогового тока кристаллов светодиодных матриц // Труды XXIX Международного симпозиума «Надежность и качество» (г. Пенза, 27 мая – 01 июня 2024 г.). – Пенза: ПГУ, 2024. – Т. 2. – С. 52-55.
7. Пат. 2 541 098 РФ Способ отбраковки мощных светодиодов на основе InGaN/GaN / Шмидт Н.М., Шабунина Е.И., Тальнишних Н.А., Черняков А.Е., Закгейм А.Л.; заявитель и патентообладатель Шмидт Наталия Михайловна. – № 2013144805/28; Заявлено 04.10.2013, Опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.
8. Измерительный комплекс для исследования электрических и оптических характеристик органических светодиодных матриц / А.Г. Лошилов, М.А. Лазько, А.А. Вомбизов [и др.] // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2014. – №2. – С. 209-214. EDN TKCERN.
9. Полишук А., Туркин А. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Компоненты и технологии. 2008. № 2, С. 25-28.
10. Frolov I.V., Zaytsev S.A., Sergeev V.A., Radaev O.A., Relationship between the luminous flux drop of LED matrices during tests with thermal resistance and parameters of the emission spectrum // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2025. – V. 18 (3.2). – P. 218-222.
11. Радаев О. А., Козликова И. С., Сергеев В. А. Измерение переходной тепловой характеристики светодиода по сдвигу спектра излучения // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 20-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара (г. Ульяновск, 5-7 декабря 2017 года). – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 243-245.
12. Белоножко А.В., Соколова Р.А. Исследование деградации люминофорных покрытий для светодиодов белого свечения. Доклад интернет-конференции ГПО «инновации – разработки и технологии – ТУСУР 2013». – 2013. – С.
13. Smirnov V.I., Sergeev V.A. & Gavrikov A.A. Measurement of the Thermal Impedance of Light-Emitting Diodes and Light-Emitting Diode Matrices. Measurement Techniques. – 2017. – Vol.60. – P.46-51.
14. ОСТ 1 01204-2012. Надежность изделий авиационной техники. Эквивалентно-циклические испытания на безотказность авиационного бортового оборудования. Москва. ФГУП «НИИСУ». – 2013. – 87 с.
15. Радаев О. А., Фролов И. В., Зайцев С. А., Сергеев В. А. Оценка темпа деградации светодиодных матриц по результатам эквивалентно-циклических ускоренных испытаний // Труды XXX Международного симпозиума «Надежность и качество» (г. Пенза, 26 мая – 01 июня 2025 г.). – Пенза: ПГУ, 2025. – Т. 2. – С. 47-49.

УДК 621.314.69

**Бростилов<sup>1</sup> С.А., Ларкин<sup>2</sup> С.Е., Чапаев<sup>3</sup> В.С., Фадеев<sup>4</sup> А.В.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

## **СИСТЕМА СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ АВТОМОБИЛЯ**

**Аннотация.** Увеличение числа автомобилей и интенсивности движения приводит к большему использованию автомобильного бензина. Количество вредных веществ зависит не только от его качества, но и от правильной работы микропроцессорной системы автомобиля. Существующие микропроцессорные системы управления двигателем настраиваются на определённый тип топлива и не способны корректировать работу двигателя при ухудшении его характеристик. Из-за добавления легколетучих присадок происходит снижение октанового числа бензина в течение всего времени его использования. В этой связи требуется коррекция работы микропроцессорной системы с целью снижения вредных выбросов. Решению поставленной задачи посвящена данная работа.

**Ключевые слова:** вредные выбросы, октановое число, коррекция работы двигателя автомобиля

**Brostilov<sup>1</sup> S.A., Larkin<sup>2</sup> S.E., Chapaev<sup>3</sup> V.S., Fadeev<sup>4</sup> A.V.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

## **VEHICLE EMISSION REDUCTION SYSTEM**

**Abstract.** The increase in the number of cars and traffic intensity leads to greater use of automobile gasoline. The amount of harmful substance emissions depends not only on its quality but also on the proper functioning of the car's microprocessor system. Existing microprocessor engine management systems are configured for a specific type of fuel and are unable to adjust the engine's operation when its characteristics deteriorate. Due to the addition of light volatile additives, the octane number of gasoline decreases throughout its usage. In this regard, adjustments of the microprocessor system are required to reduce harmful emissions. This article is devoted to addressing this problem.

**Keywords:** harmful emissions, octane number, adjustment of car engine operation

В настоящее время самым массовым продуктом нефтепереработки являются автомобильные бензины. Основная масса добываемой нефти перерабатывается в жидкие нефтепродукты, из которых преимущественно производят топлива. Бензин занимает первое место среди моторных топлив для автомобилей. При этом его использование в качестве основного источника энергии допустимо лишь при условии жесткого соответствия нормативам качества, включая соблюдение установленного химического состава и четко регламентированных физико-химических и эксплуатационных свойств [1-4].

Детонационная стойкость является основным эксплуатационным показателем автомобильных бензинов, оцениваемым октановым числом (ОЧ). Данная характеристика отражает способность топливно-воздушной смеси противостоять самовоспламенению в процессе сжатия перед воспламенением от свечи зажигания. Для каждого типа двигателя внутреннего сгорания существует регламентированное значение октанового числа, при котором достигаются оптимальные мощностные, экономические и эмиссионные параметры. Несоответствие фактического ОЧ требованиям двигателя нарушает протекание рабочего процесса: применение низкооктанового топлива вызывает детонационное горение, сопровождающееся жесткими ударными волнами. Следствием этого являются снижение эффективной мощности, увеличение удельного расхода топлива, а также повышенный износ и высокая вероятность катастрофического разрушения элементов цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Использование высокооктанового бензина в моторах, не рассчитанных на него, экономически нецелесообразно и может привести к неполному сгоранию смеси и отложениям нагара в камере сгорания.

Ключевым показателем качества автомобильного бензина выступает стабильность его физико-химических характеристик на всех этапах жизненного цикла – от транспортировки до длительного хранения. Однако применение кислородсодержащих компонентов (эфиров) для повышения детонационной стойкости вступает в противоречие с этим требованием. Высокая летучесть эфиров приводит к их ускоренному испарению, что влечет за собой необратимое снижение октанового числа. Параллельно протекают процессы окисления под воздействием кислорода воздуха: образование смолистых веществ и осадка негативно сказывается на химической стабильности топлива, что в конечном итоге ухудшает его эксплуатационные характеристики (увеличивает нагарообразование, снижает надежность топливной аппаратуры).

В современных автомобилях с электрической системой впрыска топлива и электронным блоком управления (ЭБУ) октановое число горючего выступает одним из ключевых факторов, определяющих корректность работы двигателя [5]. По мнению авторов, внедрение в конструкцию транспортного средства встроенного датчика контроля качества топлива позволило бы получать объективные данные о физико-



химических свойствах горючей смеси. Это, в свою очередь, предоставило бы возможность электронике адаптировать алгоритмы работы двигателя под реальные параметры топлива, обеспечивая оптимальные мощностные и экономические показатели.

Анализ характеристик моторного топлива показывает, что оно подвержено временной деградации и имеет ограниченный срок сохранения оптимальных свойств. Довольно быстро наблюдается снижение октанового числа на 2 и более единиц. Учитывая, что заводская калибровка двигателей производится под строго определенный сорт бензина, ухудшение качеств горючего неизбежно влечет за собой падение мощности, рост токсичности выхлопа и негативное влияние на окружающую среду. Нивелировать эти последствия возможно посредством оперативного замера октанового числа и последующей адаптации работы мотора – корректировки объема топливopодачи и угла опережения зажигания [6–10].

Для решения поставленной задачи была разработана функциональная схема системы, которая представлена на рисунке 1.

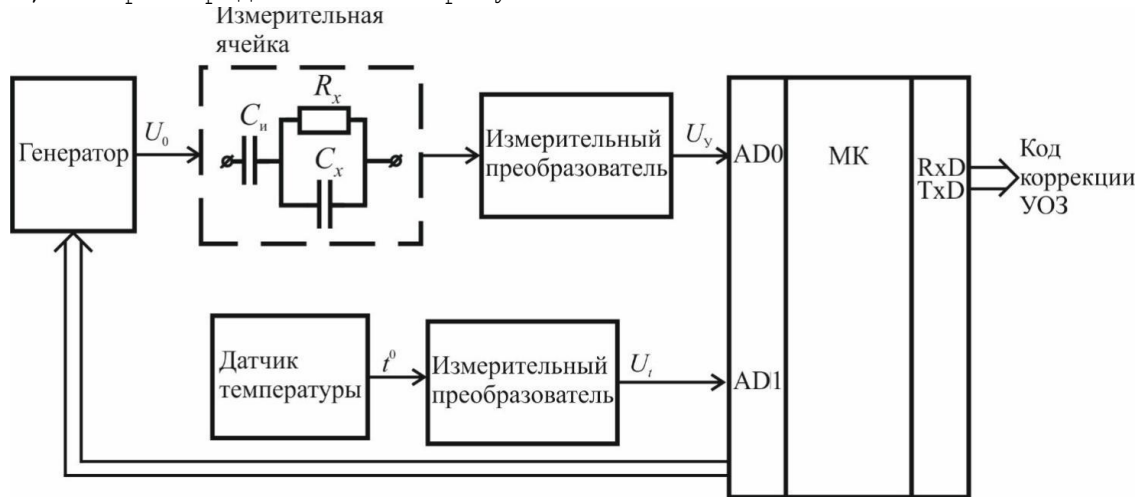


Рисунок 1 – Структурная схема системы измерения октанового числа бензина

Измерительная ячейка представляет собой две обкладки конденсатора, покрытые диэлектриком с целью защиты обкладок от агрессивной среды, коей является бензин. Тогда схема замещения измерительной ячейки будет трёхэлементная. Ёмкость  $C_x$  представляет собой измеряемый параметр. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  этой ёмкости однозначно связана с октановым числом. Сопротивление  $R_x$  представляет собой влияющий фактор, определяющий количество воды в бензине. К влияющим факторам относится так же ёмкость изоляторов  $C_{и}$ . Влияющие факторы со временем изменяются. Необходимо, чтобы система определяла только значение  $C_x$  и отстра-нилась от влияющих факторов.

Для работы ёмкостной измерительной ячейки применяется генератор, который, под управлением микроконтроллера (МК), подает сигнал синусоидальной формы на измерительный преобразователь параметров элементов ячейки в напряжение.

Работа системы коррекции угла опережения зажигания (УОЗ) осуществляется в два этапа и происходит под управлением микроконтроллера. На первом этапе ко входу подключается синусоидальное напряжение амплитудой  $U_0$  и частотой  $\omega_1 = \omega$ . Комплексное напряжение с выхода измерительного преобразователя

$$\underline{U_y} = -U_0 \frac{\frac{1}{j\omega C_{и}} + \frac{R_x \frac{1}{j\omega C_x}}{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}}{\frac{1}{j\omega C_0}} = -U_0 \frac{C_0}{C_{и}} + j \frac{\omega C_0 R_x}{1 + j\omega C_x R_x}.$$

При  $t = 0$  выражение будет иметь вид:

$$U_1 = -\frac{\omega C_0 R_x}{1 + (\omega C_x R_x)^2}.$$

Микроконтроллер фиксирует данное напряжение на входе AD0 и преобразует в цифровой код с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя. Далее следует изменение частоты входного напряжения в два раза  $\omega_2 = 2\omega$ . Измеренное при  $t = 0$  напряжение с выхода измерительного преобразователя

$$U_2 = -\frac{2\omega C_0 R_x}{1 + (2\omega C_x R_x)^2}.$$

Это напряжение так же преобразуется в цифровой код при подаче на вход AD1. После несложных преобразований значение неизвестной ёмкости равно

$$C_x = \frac{\sqrt{2}C_0U_0(U_1 - 2U_2)\sqrt{\frac{U_2 - 2U_1}{U_1 - 2U_2}}}{3U_1U_2}.$$

Из формулы емкости конденсатора конечное значение искомой диэлектрической проницаемости бензина  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}C_0U_0d(U_1 - 2U_2)\sqrt{\frac{U_2 - 2U_1}{U_1 - 2U_2}}}{3SU_1U_2\varepsilon_0}$$

Для точного определения диэлектрической проницаемости исследуемого бензина, необходимо вносить поправку значения  $\varepsilon$  по температуре, поскольку диэлектрическая проницаемость изменяется с изменением температуры. Для этого в цепь включён датчик температуры и измерительный преобразователь для него. Сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера AD1.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуреев А.А., Азев В.С. Автомобильные бензины, свойства и применения. – Москва: Нефть и газ, 1996. – 444 с.
2. Понизовкин А.Н. Краткий автомобильный справочник НИИАТ /А.Н. Понизовкин – М.: АО Трансконсалтинг, 1994. – 779 с.
3. Емельянов В.Е. Все о топливе. Автомобильный бензин свойства, ассортимент, применение. – М.: Астрель, АСТ, 2003. – 79 с.
4. А.А. Ефремов, В.Е. Песков. Высокооктановые эфиры // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2005. – №5. – с. 20-22.
5. Гирявец А.К. Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. – М.: Стройиздат, 1997. – 161с.
6. А.В. Мамикин, А.Л. Кукла, А.С. Майстренко, Е.П. Мацас, Л.М. Матвиенко. Способ экспресс-оценки октанового числа бензина с использованием портативного спектроимпедансного измерителя и методов статического анализа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2017. №4 – 5. – с. 52-60.
7. С.Н. Дугушкин. Мосты переменного тока для измерения параметров трехэлементных двухполюсников: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. технич. наук. Ульяновский государственный университет, Ульяновск, 2005.
8. А. с. №1499268 СССР. Преобразователь параметров трехэлементных нерезонансных двухполюсников // Г.И. Передельский, А.Н. Сапрыкин // Бюл. – 1989. – №29. с. 24, 25.
9. Патент 2525717 RU. Мостовой измеритель параметров двухполюсников // Г.И. Передельский, Ю.В. Диденко // Бюл. – 2014. – №23.
10. Патент 2460065 RU. Устройство для измерения октанового числа бензинов. // С.А. Поляков, М.А. Волков, Б.Р. Иванов // Бюл. – 2012. – №24.

УДК 621.316.1, 621.316.3, 338.001

**Калинин<sup>1</sup> Д.М., Бростилова<sup>2</sup> Т.Ю., Бростилов<sup>3</sup> С.А., Перетягин<sup>4</sup> А.В.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> kpra@pnzgu.ru

## **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ 10 кВ**

**Аннотация.** Рассмотрены варианты применения цифровых технологий в распределительных сетях 10 кВ. Определены приоритетные объекты модернизации (конкретные фидеры от ПС). Рассчитаны экономические показатели от внедрения сквозного IoT-мониторинга, использования цифрового двойника.

**Ключевые слова:** цифровизация, распределительные сети, мониторинг состояния, фидер, капитальные затраты

**Kalinin<sup>1</sup> D.M., Brostilova<sup>2</sup> T.Yu., Brostilov<sup>3</sup> S.A., Peretyagin<sup>4</sup> A.V.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> kpra@pnzgu.ru

## **FEASIBILITY STUDY OF THE INTRODUCTION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN 10 kV DISTRIBUTION NETWORKS**

**Abstract.** The article discusses the options for using digital technologies in 10 kV distribution networks. Priority modernization facilities (specific feeders from the substation) have been identified. The economic indicators from the introduction of end-to-end IoT monitoring and the use of a digital twin are calculated.

**Keywords:** digitalization, distribution networks, health monitoring, feeder, capital expenditures

Электроэнергетика, являясь основой современной экономики и социальной сферы, переживает этап глубокой трансформации, движимой процессами цифровизации. Традиционные распределительные сети, значительная часть которых в России была построена несколько десятилетий назад, сталкиваются с рядом системных вызовов: физическим и моральным старением оборудования, ростом пиковых нагрузок, ужесточением требований к надёжности и качеству электроэнергии со стороны потребителей, а также необходимостью интеграции распределённой генерации. В этих условиях реактивная модель управления, основанная на планово-предупредительных ремонтах и реагировании на уже произошедшие аварии, становится экономически неэффективной.

В статье в качестве объекта исследования выбран район электрических сетей (РЭС) Пензенской области, где предполагается переход к интеллектуальным сетям с целью предиктивного обслуживания, точного управления режимами, автоматического восстановления питания и минимизации потерь электроэнергии.

При полном или частичном переходе на цифровые технологии необходимо точно определить положительные и отрицательные моменты их применения.

Преимущества заключаются в следующем:

1 Кардинальное повышение надёжности электроснабжения. Цифровые технологии позволяют реализовать принцип «самолечения» сети. За счет интеллектуальных устройств релейной защиты, автоматики и систем АСТУ среднего напряжения, процесс обнаружения, локализации и изоляции поврежденного участка, а также восстановления питания потребителей по резервным линиям происходит за секунды и минуты, практически без участия диспетчера. Это приводит к прямому сокращению ключевых показателей – SAIDI (средняя продолжительность перерыва питания) и SAIFI (средняя частота перерывов питания), что является главным потребительским эффектом цифровизации.

2 Снижение операционных и капитальных затрат (ОРЕХ и CAPEX). Внедрение систем предиктивной аналитики и мониторинга состояния оборудования (Condition-Based Maintenance) переводит обслуживание с планово-предупредительного на фактически необходимое. Это минимизирует затраты на необоснованные ремонты и позволяет предотвращать крупные аварии. Кроме того, массовая установка датчиков и использование беспроводных технологий связи сокращают затраты на монтаж и обслуживание километров контрольных кабелей. Удаленный сбор данных и диагностика снижают логистические расходы на выездные бригады.

3 Значительное снижение потерь электроэнергии. Цифровизация обеспечивает тотальную наблюдаемость сети. Интеллектуальные системы учета (АИИС КУЭ 2.0) в сочетании с данными от датчиков позволяют проводить детальный баланс мощности и точно определять зоны максимальных технических и коммерческих потерь. Последующая оптимизация сетевых режимов (перетоков мощности, уровней напряжения) с помощью цифровых систем управления ведет к их прямому снижению, что дает многомиллионный экономический эффект на уровне региона.

4 Повышение пропускной способности и эффективности использования активов. За счет непрерывного мониторинга в реальном времени (температура проводов,

нагрузка трансформаторов) появляется возможность перейти от консервативных нормативных лимитов к динамическому рейтингу оборудования. Это позволяет безопасно загружать сети выше паспортных норм в благоприятных условиях, откладывая масштабные инвестиции в строительство новых линий и подстанций.

Наряду с преимуществами перехода на цифровые технологии существуют определённые риски:

1 Высокие первоначальные инвестиции (CAPEX). Полномасштабная цифровизация требует значительных единовременных вложений в новое оборудование (цифровые терминалы, датчики, коммуникационную инфраструктуру), программное обеспечение и системы интеграции. Формирование убедительного бизнес-кейса с четким расчетом окупаемости становится критически важным этапом для принятия решений.

2 Критическая зависимость от кибербезопасности. Переход к полностью цифровому, связанному управлению резко расширяет поверхность для потенциальных кибератак. Защита критической информационной инфраструктуры от несанкционированного доступа, вредоносного ПО и хакерских атак становится задачей национальной безопасности. Требуется реализация многоуровневой защиты (физической, сетевой, криптографической) в соответствии со строгими стандартами (ГОСТ Р 57580).

3 Острая нехватка квалифицированных кадров. Цифровая энергетика требует новой генерации инженеров, сочетающих глубокие знания в энергетике с компетенциями в IT, программировании, работе с большими данными. Существующие кадры требуют масштабной профессиональной переподготовки, что является долгосрочным и ресурсоемким процессом.

4 Проблема интеграции с устаревшей инфраструктурой (Legacy systems). Большинство существующих сетей представляют собой «лоскутное одеяло» из оборудования разных эпох и производителей. Создание единого цифрового контура часто требует разработки сложных и дорогостоящих шлюзов, адаптеров и промежуточных решений, что может нивелировать часть преимуществ и увеличить риски сбоев.

«Волжский» район электрических сетей (РЭС) является частью распределительного комплекса Пензенской области и представляет собой типичный объект с инфраструктурой, сочетающей исторически сложившиеся сети и современные присоединения. Его анализ позволяет выявить системные проблемы, характерные для многих территориальных сетевых организаций.

Количественные и структурные показатели (на основе отчетных данных за 2024–2025 гг.) следующие.

По итогам 2024 года отпуск в сеть РЭС (без учета прямых фидеров) составил порядка 75 тыс. кВт·ч. Это значительный объем, подчеркивающий масштаб объекта и потенциальный экономический эффект от оптимизации.

Сеть РЭС формируется из нескольких питающих центров, включая подстанции 110/10 кВ – 2 объекта и 35/10 кВ – 7 объектов. От этих ПС отходит достаточное количество фидеров низкого напряжения, питающих смешанную нагрузку – от населенных пунктов и сельского хозяйства до промышленных предприятий.

На объектах установлены приборы учета устаревших серий. На основе анализа данных выявлены общие проблемы на системном уровне:

Высокий и нестабильный уровень суммарных потерь. Фактические потери в 2024 году достигли 11,24% (7 926 тыс. кВт·ч), что является индикатором неэффективности. Динамика носит выраженный сезонный характер с пиками в зимние месяцы (до 18,6% в декабре), что указывает на чувствительность сети к росту нагрузок и, возможно, на сезонный характер коммерческих потерь.

Потери сконцентрированы на ограниченном числе подстанций и фидеров, что позволяет применять точечный, адресный подход к модернизации, нацеленный на «центры проблем».

Модернизация существующего РЭС предполагается по двум критериям:

1 Абсолютный объем потерь (кВт·ч) – для нацеливания на участки с наибольшим экономическим ущербом.

2 Относительный уровень потерь (%) и структура (технические/коммерческие) – для выявления участков с наибольшим потенциалом улучшения и определения характера необходимых мер.

Выбраны приоритетные объекты:

- фидер «Мумская» от ПС 35 кВ (максимальный экономический эффект);
- фидер «Двойной» от ПС 110 кВ (снижение технических потерь и повышение надежности);
- фидер №1 от ПС 35 кВ (борьба с коммерческими потерями).

Экономический расчет включает:

Определение целевых показателей снижения потерь.

Расчет капитальных единовременных затрат (CAPEX).

Расчет ежегодных операционных доходов/экономии (годовой экономический эффект).

Определение ключевых показателей эффективности: простой срок окупаемости (РР), коэффициент экономической эффективности.

Анализ чувствительности проекта к изменению ключевых параметров.

Период анализа: 10 лет (горизонт планирования).

Ставка дисконтирования: Принимается равной 10% годовых (для упрощения в расчете простой окупаемости не используется, но упоминается).

Тариф на потери: Средневзвешенный тариф на электроэнергию для сетевой компании в Пензенской области,  $T = 4,2$  руб./кВт·ч (без НДС, на основе данных за 2024 г.).

Данные по фидерам (октябрь 2024 г., экстраполировано на год):

Фидер «Мумская» (ПС П):

Отпуск за месяц:

$$\Delta W_{\text{отп.мес}} = 40531,57 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Относительные потери:

$$\delta_{\text{отч}} = 92,247\%$$

Абсолютные потери за месяц:

$$\Delta W_{\text{мес}} = \frac{\Delta W_{\text{отп.мес}} \cdot \delta_{\text{отч}}}{100} = \frac{40531,57 \cdot 92,247}{100} = 37392 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Годовые потери (ориентировочно):

$$\Delta W_{\text{год}} = \Delta W_{\text{мес}} \cdot 12 \cdot K_{\text{сез}} = 37392 \cdot 12 \cdot 0,95 \approx 426000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.},$$

где  $K_{\text{сез}} = 0,95$  – коэффициент, учитывающий, что октябрьские потери близки к среднегодовым для такого проблемного фидера).

Фидер «Парижская» (ПС Мокшан ст.):

Отпуск за месяц:

$$\Delta W_{\text{отп.мес}} = 82738 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Относительные потери:

$$\delta_{\text{отч}} = 15,25\%$$

Абсолютные потери за месяц:

$$\Delta W_{\text{мес}} = \frac{\Delta W_{\text{отп.мес}} \cdot \delta_{\text{отч}}}{100} = \frac{82738 \cdot 15,25}{100} = 12616 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Годовые потери (ориентировочно):

$$\Delta W_{\text{год}} = \Delta W_{\text{мес}} \cdot 12 \cdot K_{\text{сез}} = 12616 \cdot 12 \cdot 1,05 \approx 159000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

где  $K_{\text{сез}} = 1,05$  – коэффициент, с учетом зимнего роста потерь).

Детализация инвестиционного проекта и расчет CAPEX

Проект цифровизации реализуется в два этапа:

1) Внедрение системы мониторинга и анализа (IoT + Digital Twin);

2) Внедрение автоматизации (АСУ СН).

В таблице 1 приведена смета капитальных затрат на реализацию мероприятий.

Таким образом, общие капитальные вложения в пилотный проект цифровизации для трех приоритетных направлений составят 8,0 млн. руб.

**Расчет годового экономического эффекта (дохода)**

1. Экономия от снижения потерь электроэнергии:

Фидер «Мумская»: за счет IoT-мониторинга и анализа в Digital Twin выявляются основные причины потерь (небаланс, коммерческие).

Достижимое снижение:  $\approx 40\%$

$$\mathcal{E}_{\text{мум}} = \Delta W_{\text{год}} \cdot 0,40 \cdot T = 426000 \cdot 0,40 \cdot 4,2 \approx 715,7 \text{ тыс.руб./год.}$$

Фидер «П»: За счет оптимизации режима (Digital Twin) и сегментации (АСУ) снижаются технические потери. Достижимое снижение:  $\approx 20\%$

$$\mathcal{E}_{\text{париж}} = \Delta W_{\text{год}} \cdot 0,20 \cdot T = 159000 \cdot 0,20 \cdot 4,2 \approx 133,6 \text{ тыс.руб./год.}$$

Фидер «Х»: за счет внедрения Smart Metering и рейдов снижаются коммерческие потери. Достижимое снижение коммерческой составляющей: 50% (от 13,1% потерь).

$$\Delta W_{\text{год.комм.}} = 82738 \cdot 0,131 \cdot 12 = 130 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч.}$$

$$\mathcal{E}_{\text{х}} = \Delta W_{\text{год.комм.}} \cdot 0,50 \cdot T = 130000 \cdot 0,50 \cdot 4,2 \approx 273 \text{ тыс.руб./год.}$$

2. Экономия операционных расходов (ОРЕХ):

Сокращение затрат на поиск повреждений на фидере «П» за счет АСУ и мониторинга:  $\sim 50$  тыс. руб./год.

Сокращение затрат на обходы и проверки учета на фидере «Х»:  $\sim 30$  тыс. руб./год.

Итого экономия ОРЕХ:

$$\mathcal{E}_{\text{орех}} = 80 \text{ тыс.руб./год}$$

3. Итого годового экономического эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_{\text{мум}} + \mathcal{E}_{\text{п}} + \mathcal{E}_{\text{х}} + \mathcal{E}_{\text{орех}} \\ \mathcal{E}_{\text{год}} = 715,7 + 133,6 + 273,0 + 80 = 1202,3 \text{ тыс.руб./год}$$

Смета капитальных затрат (CAPEX)

Таблица 1

| №           | Наименование статьи затрат                                                              | Ед. изм. | Кол-во | Цена за ед., тыс. руб. | Сумма, тыс. руб. |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|------------------------|------------------|
|             | Этап 1. Система мониторинга, анализа и Digital Twin (общая платформа для РЭС)           |          |        |                        |                  |
| 1.1         | Комплект IoT-датчиков (ток, напряжение, темп.) с передатчиком LoRaWAN                   | шт.      | 40     | 45                     | 1 800            |
| 1.2         | Серверное оборудование и ПО для платформы Digital Twin                                  | шт.      | 4      | 75                     | 300              |
| 1.3         | Серверное оборудование и ПО для платформы Digital Twin                                  | компл.   | 1      | 500                    | 500              |
| 1.4         | Работы по установке, наладке и интеграции (20% от ст.1.1-1.3)                           | -        | -      | -                      | 250              |
|             | Этап 2. Автоматизация фидера «П»                                                        |          |        |                        |                  |
| 2.1         | Комплект ячейки КСО с вакуумным выключателем и приводом для СП (секционировующий пункт) | шт.      | 3      | 750                    | 2 250            |
| 2.2         | Контроллер телемеханики и РЗА для СП с ПО                                               | шт.      | 3      | 150                    | 450              |
| 2.3         | Комплект модулей связи (GPRS/4G) для контроллеров                                       | шт.      | 3      | 50                     | 150              |
| 2.4         | СМР: монтаж, пусконаладка, программирование логики (25% от ст.2.1-2.3)                  | -        | -      | -                      | 712.5            |
| 2.5         | Проектные работы (8% от ст.2.1-2.4)                                                     | -        | -      | -                      | 288              |
|             | Этап 3. Модернизация системы учета на фидере «Х»                                        |          |        |                        |                  |
| 3.1         | Интеллектуальный счетчик (3-фазный, PLC/GPRS)                                           | шт.      | 50     | 18                     | 900              |
| 3.2         | Мобильный комплекс детекции безучетного потребления                                     | компл.   | 1      | 300                    | 300              |
| 3.3         | Работы по замене, программированию, интеграции в АИИС КУЭ                               | -        | -      | -                      | 350              |
| ИТОГО CAPEX |                                                                                         |          |        |                        | 8 000            |

**Оценка эффективности инвестиций**

Простой срок окупаемости (PP):

$$PP = \frac{K}{\Xi_{\text{год}}} = \frac{8000}{1\,202,3} \approx 6,65 \text{ лет}$$

Коэффициент экономической эффективности (простой):

$$E = \frac{\Xi_{\text{год}}}{K} = \frac{1\,202,3}{8000} \approx 0,15 \text{ (15\% годовых)}$$

Расчет дисконтированного срока окупаемости (DPP) и чистого дисконтированного дохода (NPV) за 10 лет:

Упрощенный расчет NPV при ставке  $r = 10\%$

Годовой денежный поток  $CF = \Xi_{\text{год}} = 1\,202,3$  тыс. руб.

$$NPV = \sum \left( \frac{CF}{(1+r)^t} \right) - K, \text{ где } t = 1 \dots 10$$

$$NPV = \sum \left( \frac{1\,202,3}{(1+0,1)^{10}} \right) - 8000 = 7386 - 8000 = -614 \text{ тыс. руб.}$$

Вывод: при стандартной ставке 10% проект имеет отрицательный NPV, что указывает на его недостаточную эффективность в чистом виде при таком горизонте и затратах. Срок окупаемости превышает нормативный (5 лет).

Отрицательное значение NPV в базовом сценарии указывает на необходимость поиска резервов повышения экономической привлекательности проекта. Анализ чувствительности позволяет определить ключевые факторы, влияние которых на итоговую эффективность является наиболее критичным, и найти пути их оптимизации.

Фактор 1 – Оптимизация структуры капитальных затрат (CAPEX). Основная статья CAPEX – создание общей цифровой платформы (IoT, Digital Twin)

для всего РЭС. Её стоимость в размере 2850 тыс. руб. в базовом расчёте полностью отнесена на три пилотных фидера. В реальности данная платформа является инфраструктурным активом, который будет обслуживать все фидеры РЭС. Распределение этих затрат пропорционально охвату сети является экономически обоснованным.

Предположение: платформа будет использоваться для мониторинга и анализа 10 фидеров рассматриваемого РЭС.

Расчёт скорректированных CAPEX для пилотного проекта:

Доля затрат на платформу, относимая на 3 фидера:  $2850 \cdot (3/10) = 855$  тыс. руб.

Новые совокупные CAPEX:

$K_{\text{нов}} = 855$  (доля платформы) + 3600 (АСТУ "Парижская") + 1550 (учёт "Хомяковская") = 6 005 тыс. руб.

Пересчёт эффективности:

$$PP_{\text{нов}} = \frac{K_{\text{нов}}}{\mathcal{E}_{\text{год}}} = \frac{6005}{1\,202,3} \approx 5 \text{ лет (соответствует нормативу).}$$
$$NPV_{\text{нов}} = \sum \left( \frac{1\,202,3}{(1 + 0,1)^{10}} \right) - 6005 = 7386 - 6005 = +1381,6 \text{ тыс. руб.}$$

Проект становится эффективным.

Фактор 2 – Повышение результативности мероприятий и рост денежного потока. Годовой экономический эффект (CF) напрямую зависит от достигнутого процента снижения потерь, который в базовом сценарии взят консервативно.

Для фидера «Мумская»: целевое снижение потерь на 40% основано на выявлении типовых проблем. Однако, учитывая аномально высокий исходный уровень (92,2%), комплексный аудит с применением Digital Twin может выявить грубые коммерческие и технические нарушения, устранение которых даст больший эффект.

Сценарий «Усиленный анализ»: снижение потерь на 60%.

Новый эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{муrom.нов.}} = 426\,000 \cdot 0,60 \cdot 4,2 = 426\,000 \cdot 0,40 \cdot 4,2 \approx 1073,5 \text{ тыс.руб./год}$$

Новый совокупный CF:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 1073,5 + 133,6 + 273,0 + 80 = 1560,1 \text{ тыс.руб./год}$$

При исходных CAPEX (8 000 тыс. руб.):

$$PP = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{год}}} = \frac{8000}{1560,1} \approx 5,13 \text{ года,}$$
$$NPV_{\text{нов}} = \sum \left( \frac{1560,1}{(1 + 0,1)^{10}} \right) - 8000 = +585 \text{ тыс.руб.}$$

Учёт полного эффекта от повышения надёжности (АСТУ):

В расчёте экономии учтено только снижение потерь и ОРЕХ. Внедрение АСТУ на фидере «П» предотвращает длительные перерывы в питании. Стоимость недоотпуска электроэнергии для потребителей, особенно 1-й и 2-й категорий, значительно выше тарифа на потери. Предотвращение одной крупной аварии может принести дополнительный косвенный экономический эффект в размере 200–500 тыс. руб., улучшая отношения с потребителями и снижая риски штрафов.

Фактор 3 – Использование альтернативных (льготных) источников финансирования. Ставка дисконтирования 10% соответствует стоимости капитала для коммерческих проектов. Для проектов цифровизации критической инфраструктуры могут быть доступны государственные субсидии или льготные кредиты. Суммарные капитальные затраты на пилотный проект составляют 8000 тыс. руб., а годовой экономический эффект оценивается в 1202 – 1560 тыс. руб. в зависимости от достигнутых результатов. Показано, что при корректном распределении затрат на общесистемную цифровую платформу и достижении целевых показателей проект становится высокоэффективным: срок окупаемости сокращается до 3.85 – 5.0 лет, а чистый дисконтированный доход (NPV) принимает положительное значение до +3580 тыс. руб.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 года №1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года» – документ, который способствовал интеграции принципов «Индустрии 4.0» в электроэнергетическую отрасль.
2. Федеральный закон от 13 июля 2024 года №185-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике»
3. Концепция «Цифровая трансформация – 2030» ПАО «Россети» – URL: [https://www.rossetivolga.ru/i/files/2019/2/7/kontseptsiya\\_tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](https://www.rossetivolga.ru/i/files/2019/2/7/kontseptsiya_tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf)
4. Кокуйцева, Т. В. Методические подходы к оценке эффективности цифровой трансформации предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности / Т. В. Кокуйцева, О. П. Овчинникова // Креативная экономика. – 2021. – Т. 15, № 6. – С. 2413–2430. – DOI 10.18334/ce.15.6.112192
5. Ширинкина, Е.В. Факторы, влияющие на уровень цифровизации предприятий/ Ширинкина Е.В.// Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 1. С. 139–141.
6. Григорьев, А.С. Формирование цифровых двойников конструкций и технологических процессов вывода из эксплуатации атомных электростанций/ Григорьев А.С., Клокова О.Н., Тутнов И.А., Сафронова Н.Н.// Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2025. Т. 1. С. 340–349.

УДК 621.331.5, 621.316.5

**Коптева<sup>1</sup> Т.В., Бростилова<sup>2</sup> Т.Ю., Вихорева<sup>3</sup> А.С.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> tiatyana2010@yandex.ru

<sup>2</sup> tat-krupkina@yandex.ru

<sup>3</sup> vihoreva\_anastasia@mail.ru

## **ПЕРЕХОД ОТ ШЕСТИПУЛЬСОВОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ НА ДВЕНАДЦАТИПУЛЬСОВУЮ СХЕМУ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКА**

**Аннотация.** Рассматривается система тягового электроснабжения, обоснованность замены шестипульс-  
сового выпрямителя на двенадцатипульсовый. Приведены расчеты параметров выпрямителей.

**Ключевые слова:** электрифицированный транспорт, система тягового электроснабжения, выпрямитель,  
электрооборудование, напряжение

**Kopteva<sup>1</sup> T.V., Brostilova<sup>2</sup> T.Yu., Vikhoreva<sup>3</sup> A.S.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> tiatyana2010@yandex.ru

<sup>2</sup> tat-krupkina@yandex.ru

<sup>3</sup> vihoreva\_anastasia@mail.ru

## **TRANSITION FROM A SIX - PULSE BRIDGE CIRCUIT TO A TWELVE-PULSE CIRCUIT IN THE SECTION'S TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM**

**Abstract.** This article examines the traction power supply system and the feasibility of replacing  
a six-pulse rectifier with a twelve-pulse one. Calculations of rectifier parameters are provided.

**Keywords:** electrified transport, traction power supply system, rectifier, electrical equipment,  
voltage

Система тягового электроснабжения – это комплекс устройств (подстанции, кон-  
тактная сеть, питающие и отсасывающие линии), предназначенный для передачи  
электрической энергии от внешних сетей к электроподвижному составу. В России  
применяются системы постоянного (3,3 кВ) и переменного (27,5 кВ или 2×25 кВ)  
тока. Основная функция – понижение напряжения и преобразование тока для обес-  
печения движения поездов.

Система электроснабжения электрифицированной железной дороги состоит из внеш-  
ней части системы электроснабжения и тяговой части, включающей тяговые подстан-  
ции линейных устройств и тяговой сети. Основным потребителем электрической  
энергии в системе тягового электроснабжения является локомотив.

Глобальная электрификация позволит значительно шире использовать локомотивы  
большой мощности, а именно вместо тепловозов М62, М62У, ТЭП70 – электровагоны  
ВЛ10, ВЛ80, ЭП1. Благодаря этому, повысятся пропускная и провозная способности  
дороги, увеличатся скорости движения поездов и их весовые нормы. Расчетами  
доказано, что электрифицированная магистраль более выгодна за счет меньшего  
потребления энергетических ресурсов, так как используемая электроэнергия выра-  
батывается на крупных гидро- и атомных электростанциях, а также на тепловых  
станциях, сжигающих низкосортное топливо, непригодное для дизельной тяги. Кроме  
того, на электрифицированной дороге можно экономить электроэнергию благодаря  
рекуперативному торможению.

Дальнейшее совершенствование электрической тяги требует глубокого анализа  
следующих факторов: выбор рода тока и уровня напряжения в тяговой сети, а также  
на электроподвижном составе. В частности, целесообразно развивать работы,  
направленные на повышение уровня напряжения в контактной сети, переход на рас-  
пределенное питание электрифицированных линий, перевод отдельных участков с  
постоянного тока на переменный. Методику технико-экономического обоснования  
электрификации новых линий следует откорректировать с учетом современных соци-  
ально-экономических условий.

Основным оборудованием на тяговой подстанции являются силовой трансформатор  
и преобразовательный агрегат, который включает в себя выпрямители (кремниевые  
преобразовательные устройства). Известны описания схем трехфазных выпрямителей  
тяговых подстанций: схема две обратные звезды с уравнительным реактором, ше-  
стипульсовая мостовая схема и двенадцатипульсовая мостовая схема. Схемы содер-  
жат трехфазный трансформатор и диоды, подключенные к вторичным обмоткам трех-  
фазных трансформаторов. Диоды соединены в соответствии с видом схемы: шесть  
диодов с общим катодом для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором,  
шесть диодов по схеме трехфазного мостового выпрямителя для шестипульсовой мо-  
стовой схемы и двенадцать диодов по шесть штук в каждой из двух схем последо-  
вательно соединенных мостовых выпрямителей для двенадцатипульсовой мостовой



схемы [1]. На рисунке 1 приведена принципиальная схема 12-пульсового выпрямителя.

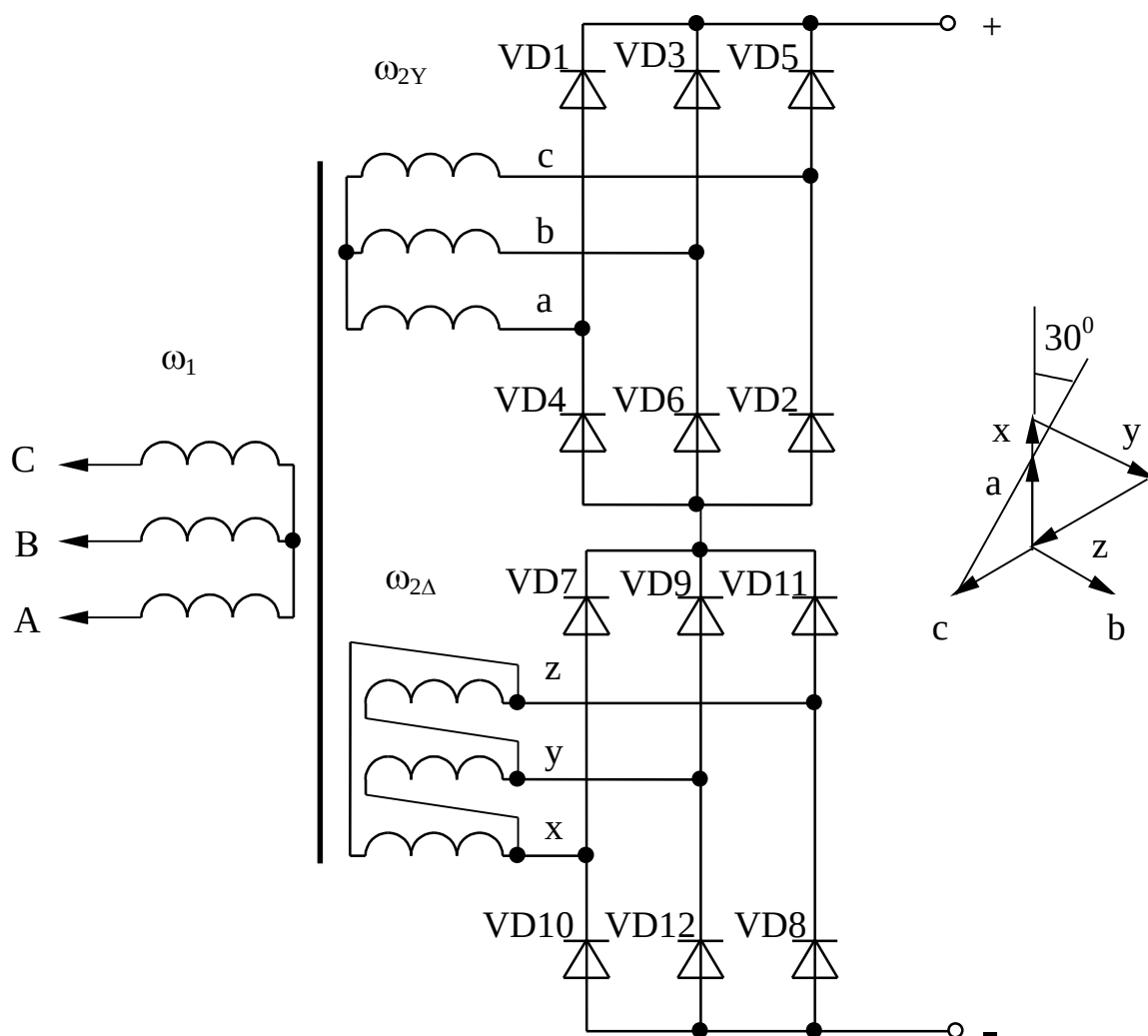


Рисунок 1- Принципиальная схема 12-пульсового выпрямителя и векторная диаграмма напряжений в вентильных обмотках трансформатора [1]

Двенадцатипульсовые выпрямители могут иметь **последовательное** или **параллельное** соединение шестипульсовых мостов.

**Последовательная схема** предполагает использование специально разработанных сухих преобразовательных трансформаторов и выпрямителей на основе таблеточных лавинных вентилей. В такой схеме отсутствует уравнительный реактор, что снижает массогабаритные показатели трансформаторного оборудования и его стоимость.

**Параллельная схема** требует наличия уравнительного реактора для выравнивания токов в параллельных мостах. Однако это увеличивает суммарную установленную мощность трансформаторного оборудования и требует дополнительных затрат на материалы.

Внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей возможно двумя способами:

**Приобретение нового оборудования** – тяговых трансформаторов и выпрямительных установок.

**Модернизация ранее установленного оборудования**, предназначенного для шестипульсовых мостовых схем.

Известно также устройство универсального выпрямителя тяговой подстанции ТПЕД-3150-3,3к-У1, содержащее трехфазный трансформатор ТРДП-12500/10ЖУ1, включенный по схеме звезда/звезда-треугольник, и шесть шкафов с диодами, которое может быть использовано для создания любой схемы выпрямителя: две обратные звезды с уравнительным реактором, шестипульсовой мостовой схемы и двенадцатипульсовой мостовой схемы. Выходное напряжение составляет 3300 В, выходной ток – 3150 А [2].

Недостатками данного устройства являются невозможность одновременного использования в различных схемах выпрямителей и опасные величины напряжений и токов, исключающие возможность наблюдения осциллограмм в характерных точках схем.

На одном из участков в системе тягового электроснабжения предложено заменить старое оборудование на выпрямители по двенадцатипульсовой схеме.

Была разработана математическая модель, позволяющая моделировать схемы выпрямителей, используемых на тяговых подстанциях, и обеспечить безопасные условия исследования данных схем.

Это достигается тем, что в известное устройство, содержащее трехфазный трансформатор, включенный по схеме «звезда/звезда-треугольник» и двенадцать диодов, включенных по шесть штук в две схемы мостовых трехфазных выпрямителей, дополнительно введены еще две группы вторичных обмоток трехфазного трансформатора, одна из которых включена по схеме «звезда», а другая – по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором»; двенадцать диодов, первые шесть из которых включены по схеме мостового трехфазного выпрямителя и подключены к дополнительным вторичным обмоткам, включенным по схеме «звезда», вторые шесть диодов включены по схеме с общим катодом и подключены к дополнительным вторичным обмоткам, включенным по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором»; коммутатор, позволяющий подключать плюсовой и минусовой выводы исследуемого в данный момент выпрямителя к нагрузке; амперметр и вольтметр постоянного тока, с помощью которых измеряется ток и напряжение в нагрузке; нагрузка, представляющая собой набор резисторов и дроссель. Для обеспечения безопасных условий исследования схем напряжение всех вторичных обмоток выбирается в 100 раз меньше, а ток – в 1000 раз меньше, чем в известном устройстве.

Расчет проектных параметров производится для номинального выпрямленного тока  $I_{дн}$  при номинальном напряжении в питающей сети  $U_{1л}$ . Напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{d0} = \frac{U_{dH}}{1 - A \frac{u_K}{100}} = \frac{3300}{1 - 0,26 \frac{12}{100}} = 3409 В, ,$$

где  $A$  – коэффициент схемы, для двенадцати пульсовых схем преобразователей  $A=0,26$ ;

$u_K = u_{КТ} + u_{КС}$  – напряжение короткого замыкания, %;

$u_{КТ}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$u_{КС}$  – напряжение короткого замыкания питающей сети, %.

Для предварительного расчета следует принять  $u_{КС}=1,5 u_{КТ}$ , т.е.  $u_K=12$ .

Расчетная мощность выпрямителя

$$S_d = U_{d0} \cdot I_{дн};$$

$$S_d = 3409 \cdot 3150 = 10738,35 \text{ кВА.}$$

Действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора

$$U_{2B} = U_{d0} / 2,34;$$

$$U_{2B} = 3409 / 2,34 = 1456,8 \text{ В.}$$

Действующее значение тока вторичной обмотки:

$$I_{2B} = \frac{I_{дн}}{2\sqrt{3}}.$$

$$I_{2B} = \frac{3150}{2\sqrt{3}} = 910,4 \text{ А.}$$

Номинальную расчетную мощность вторичной обмотки

$$S_{2B} = 3 U_{2B} \cdot I_{2B};$$

$$S_{2B} = 3 \cdot 1456,8 \cdot 910,4 = 1326,27 \text{ кВА.}$$

Действующее значение фазного напряжения на сетевой (первичной) обмотке трансформатора

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}};$$

$$U_{1\phi} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773,5 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации в режиме выпрямителя

$$K_{TB} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2B}};$$

$$K_{TB} = \frac{5773,5}{1456,8} = 3,96.$$

Действующее значение тока сетевой обмотки

$$I_{1B} = \frac{I_{дн}}{K_{TB} \sqrt{\frac{2}{3}}};$$

$$I_{1B} = \frac{3150}{3,96 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}} = 975,2 \text{ А.}$$

Номинальную мощность сетевой обмотки

$$S_{1B} = 3 U_{1\phi} \cdot I_{1B}$$

$$S_{1B} = 3 \cdot 5773,5 \cdot 975,2 = 16890 \text{ кВА.}$$

Типовую мощность трансформатора

$$S_T = 1,26 S_d;$$

$$S_T = 1,26 \cdot 10738,35 = 12150,3 \text{ кВА.}$$

По рассчитанной типовой мощности  $S_T$  необходимо выбрать ближайшее большее стандартное значение мощности трансформатора.

Выбираем трансформатор мощностью 12500 кВА.

Внедрение 12-пульсовых выпрямителей позволяет значительно сократить материалоёмкость преобразовательных агрегатов. Ранее выпускавшиеся трансформаторы ТМРУ-16000/10 весили около 42 т, а такой же мощности новый тяговый трансформатор ТРДП-12500/10-24 т, т. е. массогабаритный показатель трансформатора прежней схемы выпрямления равен 3,5 кг/кВт, а нового – 2 кг/кВт. Если учесть, что ОАО «РЖД» до 2030 года получит 412 тяговых трансформаторов, то сокращение расходов таких дефицитных материалов, как медь, тонколистовая электротехническая сталь, трансформаторное масло, превысит 7 тыс. т. Это позволяет изготовить дополнительно примерно 300 подобных трансформаторов и даёт экономический эффект около 549 млн. руб.

Переход на 12-пульсовые схемы выпрямления позволяет повысить качество электрической энергии, улучшить форму кривой потребляемого тока, уменьшить действующее значение сетевого тока при том же потребляемом тяговом токе и в конечном итоге повысить КПД тяговых трансформаторов на 0,2–0,4%, что даёт ежегодно экономии электрической энергии около 0,5 млн. кВт·ч, на каждый преобразовательный агрегат.

Таким образом, использование агрегатов с меньшей мощностью, но по многопульсовым схемам, обеспечит снижение потерь электроэнергии при удовлетворительном режиме напряжения в тяговой сети, сокращение капиталовложений при уменьшении расхода дефицитных электротехнических материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасенко, А. В. Системы тягового электроснабжения железных дорог : учебное пособие / А. В. Тарасенко. – Омск : ОмГУПС, 2020. – 69 с. – ISBN 978-5-949-41256-5. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/165707> (дата обращения: 09.04.2026).

2. Выпрямители серии В-ТПЕД, В-ТППД для тяговых подстанций железных дорог постоянного тока 3,3 и 1,65 кВ <http://etc-pluton.ru/index.php?id=38> (дата обращения: 09.04.2026).

3. Выпрямительные агрегаты для тяговых подстанций <https://electricalschool.info/main/drugoe/1213-vyprjamitelnye-agregaty-dlja-tjagovykh.html> (дата обращения: 09.04.2026).

УДК 621.317.321

**Ашанин<sup>1</sup> В.Н., Ларкин<sup>2</sup> С.Е.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> eltech@pnzgu.ru

### **АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНОЕ УСТРОЙСТВО ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НИЗОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ ОТ ПОМЕХ ОБЩЕГО ВИДА**

**Аннотация.** При проведении измерений в энергонасыщенной среде необходимо обеспечить защиту от воздействия помех общего вида, что обеспечивается гальваническим разделением электрической цепи измеряемой величины. Особенно эта задача актуальна при измерении низковольтных маломощных электрических сигналов. Для ее решения предлагается реализация устройства гальванического разделения напряжений низкого уровня милливольтового диапазона на основе прецизионного интегрального операционного усилителя с промежуточной модуляцией-демодуляцией напряжения. Приводятся принципиальная электрическая схема и результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** устройство гальванического разделения, помеха общего вида, операционный усилитель, разделительный трансформатор, отрицательная обратная связь, погрешность линейности

**Ashanin<sup>1</sup> V.N., Larkin<sup>2</sup> S.E.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> eltech@pnzgu.ru

### **AMPLITUDE-PULSE DEVICE WITH GALVANIC ISOLATION FOR PROTECTION OF MEASURING LOW-VOLTAGE CIRCUITS FROM COMMON MODE INTERFERENCE**

**Abstract.** When conducting measurements in an energy-saturated environment, it is necessary to ensure protection against common-mode interference, which is provided by galvanic isolation of the electrical circuit of the measured quantity. This task is particularly relevant when measuring low-voltage, low-power electrical signals. To address this, a device for galvanic isolation of low-level millivolt-range voltages based on a precision integrated operational amplifier with intermediate voltage modulation-demodulation is proposed. The schematic diagram and the results of experimental studies are presented.

**Keywords:** galvanic isolation device, common-mode interference, operational amplifier, isolation transformer, negative feedback, linearity error

В измерительной технике имеется достаточно много задач, сводящихся к измерению сигналов низкого уровня, осуществляемые обычно в энергонасыщенной среде в непосредственной близости от электротехнического оборудования, являющихся источниками различного вида помех. Результаты исследований, проведенных в работе [1], показали, что на многих промышленных объектах уровень помех общего вида лежит в пределах от десятков милливольт до сотни вольт, а помех нормального вида от единиц до сотен милливольт. При этом доминирующей является помеха с частотой сети питающего напряжения.

Присутствие такого уровня помех на входе АЦП требует специальных мер по обеспечению их помехозащищенности. При этом наиболее важной областью следует считать построение измерительных устройств, предназначенных для многоточечных измерений и обеспечивающих высокое подавление помех в сочетании с малым временем измерения и высокой статической точностью.

Наиболее простым и эффективным методом борьбы с помехой общего вида является гальваническое разделение цепей источника сигнала и измерительного устройства [2-4]. Причем в многоканальной измерительной аппаратуре гальваническое разделение может быть осуществлено двумя путями:

- использованием в каждом канале индивидуального устройства гальванического разделения (УГР);

- объединением в группу одного УГР от единиц до нескольких сотен каналов. Таким образом осуществлена гальваническая развязка в измерительной системе, описанной в [4]. При использовании группового УГР резко снижается объем оборудования и улучшаются технологические свойства за счет снижения объема намоточных работ. Однако в этом случае быстродействие систем обычно невелико [5]. Поэтому для ИИС, работающих в реальном масштабе времени, требуется применение индивидуальных УГР в каждом канале. В этом случае встает вопрос минимизации габаритов, потребляемой мощности и обеспечения высоких метрологических характеристик УГР в низковольтных измерительных цепях.

Данным требованиям в некоторой мере могут удовлетворять УГР на основе интегрального операционного усилителя (ОУ) постоянного тока К140УД13 с промежуточной модуляцией (М) и демодуляцией (ДМ) сигнала. Структурная схема устройства представлена на рис. 1, где место включения элемента гальванического разделения показано штриховой линией. При таком построении УГР снижаются требования к разделительному трансформатору [4], поскольку цепью отрицательной обратной связи не охвачен только демодулятор ДМ2. Действительно, в данном случае коэффициент передачи устройства  $K_p$  определяется выражением

$$K_{\Pi} = K_{12}/\beta = K_{12}/K_{13}\alpha \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент обратной связи;  $K_{12}$  и  $K_{13}$  – коэффициенты трансформации с обмотки на выходе усилителя на обмотки ДМ1 и ДМ2.

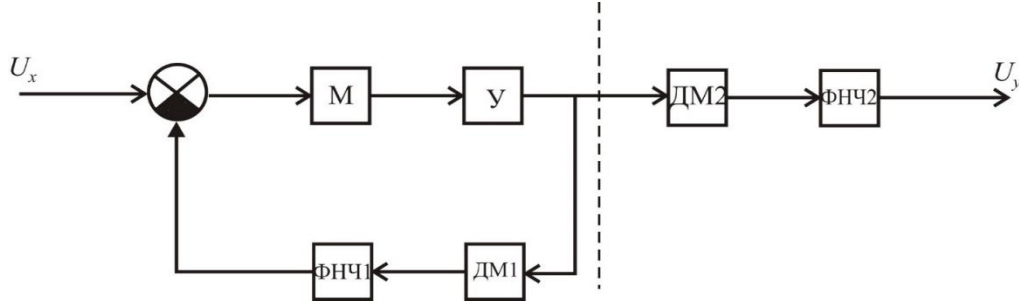


Рисунок 1 – Структурная схема амплитудно- импульсного УГР

Из выражения (1) следует, что точность коэффициента передачи УГР определяется точностью задания коэффициентов трансформации  $K_{12}$  и  $K_{13}$ , и параметрами усилителя. При выполнении условия равенства  $K_{12} = K_{13}$  уравнение (1) принимает вид

$$K_{\Pi} = 1/\alpha.$$

Отсюда можно сделать вывод, аналогично, как и в [3], что габариты трансформатора могут быть уменьшены, поскольку не требуется большого значения индуктивности холостого хода.

Принципиальная схема разработанного УГР представлена на рис. 2. С целью обеспечения коэффициента передачи устройства близким к единице параметр  $\alpha$  выбирается равным единице, то есть усилитель включается в режиме повторителя напряжения. Вследствие этого коэффициент передачи УГР принимает вид

$$K_{\Pi} = \frac{K \cdot K_{12}}{1 + K \cdot K_{13}}.$$

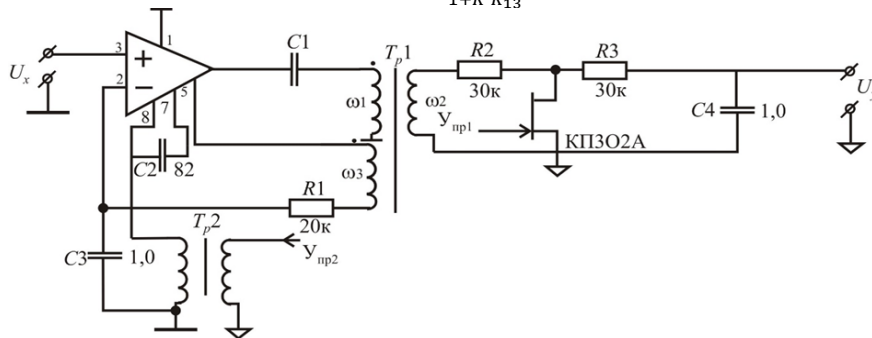


Рисунок 2 – Принципиальная схема УГР на основе ОУ К140УД13

При принятых ранее условиях  $K_{12}=K_{13}$ , получим

$$K_{\Pi} = K/(1 + K), \quad (2)$$

где  $K$  – собственный коэффициент усилителя ОУ. Для интегрального ОУ К140УД13 коэффициент усиления напряжения  $K \geq 10$  [6]. При этом, как следует из (2), коэффициент передачи УГР находится в диапазоне  $1 > K_{\Pi} \geq 0,9$ .

Экспериментальная проверка разработанного УГР показала, что основная погрешность устройства не превышает 0,1%. При этом погрешность линейности на диапазонах от нуля до  $\pm 10$  мВ и  $\pm 50$  мВ составляет, соответственно, 0,07% и 0,08% (рис.3,1,3.2, соответственно). Дополнительная температурная погрешность устройства составила 0,02%/К, что определяется в основном низким значением коэффициента усиления ОУ и его нестабильностью при изменении температуры. Потребляемая мощность гальванически развязанной части не более 150 мВт.

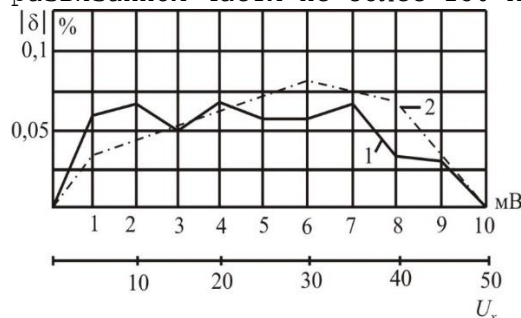


Рисунок 3 – Погрешность линейности УГР сигналов низкого уровня на диапазонах 10 мВ (1) и 50 мВ (2)

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить о перспективности применения предложенной схемы УГР, отвечающего требованиям современной микроэлектроники [7] и имеющего малые габариты, потребляемую мощность и достаточно высокие метрологические характеристики при простоте схемной реализации.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кондалев, А.И. Классификация и экспериментальное исследование помех на объектах автоматизации/ А.И. Кондалев, В.А. Фабричев. Киев, 1976г. – 35 с.
2. Прянишников В.А. Цифровые интегрирующие вольтметры переменного тока. В.А. Прянишников //Л.:Энергия. 1978 г. –224 с.ил.
3. Ермолов, Р.С. Электроизмерительные устройства для диагностики машин и механизмов/ Р.С. Ермолов, Р.А. Ивашев, В.К. Колесник, Г.Ф. Морозов – М.: Энергия. 1979 г.–248 с.
4. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах/ В.С. Гутников – Л.: Энергия. 1980 г. –248 с.
5. Алексеев, Е.Л. Групповое устройство гальванического разделения для многоканальных ИИС/ Е.Л. Алексеев, В.М. Педик. //Измерительная техника, 1980 г., N8.–С.19-21.
6. Нефедов, А.В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. Том 7. / А. В. Нефедов. – М.: ИП РадиоСофт, 1999г. – 640с.:ил.
7. Алмаметов, В.Б. Современные проблемы развития микроэлектроники/В.Б. Алмаметов, В.В. Марченко А.В. Кузина, Е.С. Суряев, Л.А. Тюрина// Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза, издательство ПГУ. 2020, Т. 1. – С. 17-19.

УДК 620.9

**Голобоков<sup>1</sup> С.В., Рудин<sup>2</sup> А.Р., Цыбаров<sup>3</sup> Д.В., Арзамасов<sup>4</sup> Н.В.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

## **ИНТЕГРАЦИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ВОДЫ В СЕТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ИНСОЛЯЦИИ**

**Аннотация.** Рассматривается проблема нестабильной работы солнечных электростанций (СЭС), обусловленная изменчивостью инсоляции. Для повышения эффективности СЭС предлагается интеграция электролизера в качестве управляемой балластной нагрузки. Целью исследования является количественная оценка влияния электролизера на стабильность работы СЭС.

Установлено, что предложенная конфигурация улучшает совместимость солнечной электростанции с распределительной сетью и формирует экономический эффект за счёт перевода избыточной генерации в топливо – зелёный водород. Результаты работы подтверждают высокую эффективность интеграции электролизеров для повышения эксплуатационной надёжности объектов солнечной энергетики и могут быть использованы при проектировании гибридных солнечно-водородных комплексов.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, электролизер, управляемая балластная нагрузка, стабильность генерации, переменная инсоляция, качество электроэнергии, адаптивное управление, зелёный водород

**Golobokov<sup>1</sup> S.V., Rudin<sup>2</sup> A.R., Tsybarev<sup>3</sup> D.V., Arzamasov<sup>4</sup> N.V.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

## **INTEGRATION OF A WATER ELECTROLYZER INTO A NETWORK OF SOLAR POWER PLANTS WITH VARIABLE INSOLATION**

**Abstract.** The article discusses the problem of unstable operation of solar power plants (SES) due to the variability of insolation. To increase the efficiency of the SES, the integration of the electrolyzer as a controlled ballast load is proposed. The aim of the study is to quantify the effect of the electrolyzer on the stability of the SES.

It is established that the proposed configuration improves the compatibility of the solar power plant with the distribution network, and generates an economic effect by converting excess generation into fuel – green hydrogen. The results of the work confirm the high efficiency of the integration of electrolyzers to increase the operational reliability of solar energy facilities and can be used in the design of hybrid solar-hydrogen complexes.

**Keywords:** solar power plant, electrolyzer, controlled ballast load, generation stability, variable insolation, power quality, adaptive control, green hydrogen

Широкое внедрение СЭС в современные энергосистемы сдерживается объективными вызовами, связанными с изменчивостью метеорологических условий. Переменная инсоляция, обусловленная прохождением облачных фронтов, сезонными колебаниями угла падения солнечных лучей и атмосферными явлениями, приводит к нестабильности выходной мощности солнечных панелей. Такие колебания создают дополнительную нагрузку на резервное генерирующее оборудование, провоцируют частые переходные процессы и могут негативно сказываться на режиме в распределительной сети.

Традиционные методы стабилизации, включающие применение аккумуляторных накопителей или резервирование генерирующих мощностей, характеризуются значительными капитальными затратами и ограниченным ресурсом. Интеграция электролизера воды в качестве управляемой балластной нагрузки СЭС представляет собой перспективное инженерное решение, позволяющее потреблять максимальную мощность во всех режимах генерации СЭС. В составе СЭС применяют аккумуляторы в качестве активного демпфера мощности, сглаживающего суточные провалы и пики выработки [3].

Повышение эффективности системы электроснабжения с СЭС основано на способности электролизера оперативно изменять потребляемую мощность в широком диапазоне, реагируя на текущий уровень генерации СЭС. При превышении выработки над лимитом выдачи в сеть или при резких скачках нагрузки электролизер автоматически поглощая избыточную энергию и преобразует её в химическую энергию водорода. Обратный процесс происходит при снижении освещённости, когда потребляемая мощность электролизера плавно уменьшается, предотвращая резкие просадки напряжения и частоты.

Такая динамика обеспечивает более равномерный режим работы силовой электроники, снижает термические нагрузки на полупроводниковые компоненты инверторов и минимизирует количество критических переходных процессов. Практика эксплуатации СЭС подтверждает, что такая конфигурация позволяет трансформировать стохастический характер солнечной генерации в предсказуемый профиль, соответствующий требованиям сетевых операторов.

Для количественной оценки влияния электролизера на стабильность работы СЭС был проведён сравнительный анализ эксплуатационных показателей двух конфигураций: базовой системы без управляемой нагрузки и модернизированного комплекса с

интегрированным электролизером. Моделирование выполнено в течение летнего месяца с фиксацией параметров в условиях различной метеорологической обстановки, включая периоды стабильной ясной погоды, облачности и резких изменений инсоляции.

Рассмотрим режимы работы локальной энергосистемы в условиях нестабильной генерации СЭС. Суточный график нагрузок энергосистемы условно поделен на два периода – дневной и ночной. Мощность потребителей днем составляет 1 МВт, ночью мощность снижается до 670 кВт. Длительность дневного и ночного периода равна 12 часов, суточный расход электроэнергии в рабочие дни равен 20 МВтч и 12 МВтч – в выходные и праздничные дни.

В составе СЭС применены модули солнечных панелей по 1 МВт, каждый модуль работает на инвертор и аккумуляторную батарею. Емкость батареи позволяет в течение светового дня запастись объемом электроэнергии 12 МВтч, необходимый для питания нагрузки в вечернее и ночное время. Продолжительность эффективной работы солнечных панелей равна 8 часов. Для оптимизации режимов работы СЭС применены 2 варианта – установленная мощность СЭС равна 6 и 10 МВт.

Для изучения влияния климатических факторов в течение месяца принято 9 дней ясной погоды, 9 дней облачной. Пасмурных дней принято 7 и дождливой погоды 6 дней. Все эти дни в течение месяца распределены случайным образом. Модель применена для летнего месяца, максимальная инсоляция составляет 800 Вт/м<sup>2</sup>. Мощность генерации в облачные дни составляет 70 % от пиковой, в пасмурную погоду мощность снижается до 40 %. В дождливую погоду мощность генерации не превышает 12 %.

Для покрытия нагрузок в тот период, когда мощности и объема генерации электроэнергии солнечными модулями недостаточна, в состав системы электроснабжения встроена резервная дизель-электростанция с двумя агрегатами по 500 кВт. Результаты моделирования представлены в виде объемов генерации СЭС, месячного потребления электроэнергии и объемов выработки резервной электростанцией. Графики указанных величин в течение месяца представлены на рис 1 и 2. При подключении электролизеров избыточная мощность СЭС направляется на выработку водорода.

Методика оценки устойчивости энергосистемы заключается в сравнении суточного объема генерации и потребления. При недостаточной генерации необходимо включать резервную электростанцию. В течение месяца подсчитывается число подключений резервной электростанции. Также оценивается величина дефицита мощности и объема электроэнергии, выработанной дизель-электростанцией.

Для СЭС с установленной мощностью солнечных модулей 6 МВт объем генерации за месяц равен 640 МВтч. Для питания нагрузок требуется 556 МВтч. Графики зависимостей представлены на рис. 1. Суммарный объем генерации СЭС превышает объем потребления. За счет колебаний инсоляции в течение месяца дефицит генерации СЭС наблюдается 13 дней. Объем генерации резервной электростанции составил 144 МВтч или 30 % от объема потребления. При подключении электролизеров балансная нагрузка принимает 228 МВтч, почти в 2 раза больше, чем резервная генерация.

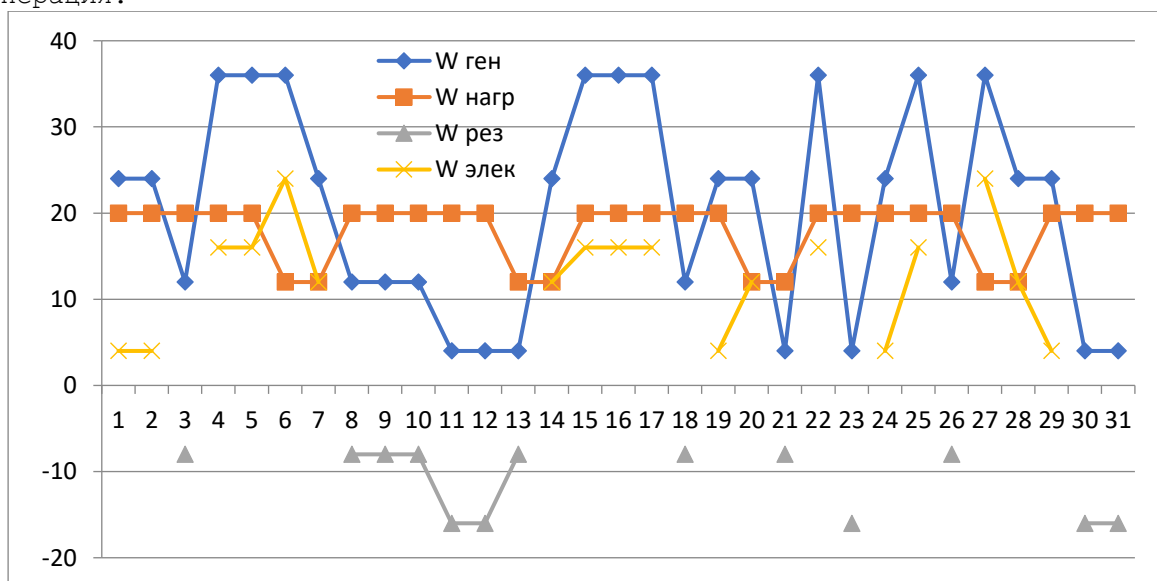


Рисунок 1 – Режимы работы СЭС с мощностью 6 МВт

Максимально возможный объем генерации электроэнергии за месяц

$W_{\max} = P \cdot t \cdot d = 6 \cdot 8 \cdot 31 = 1488 \text{ МВтч}$ .

Коэффициент использования установленной мощности



$$K_{\text{исп}} = W_{\text{потр}} / W_{\text{макс}} = (556 - 144) / 1488 = 0,28 = 28 \%$$

При подключении электролизеров объем потребления увеличится за счет электролизера, коэффициент использования будет выше.

$$K_{\text{исп}} = W_{\text{потр}} / W_{\text{макс}} = (556 - 144 + 228) / 1488 = 0,43 = 43 \%$$

Коэффициент использования мощности СЭС с электролизером увеличился в 1,5 раза. Число дней включения резервной электростанции равно 13, объем вырабатываемой электроэнергии – 144 МВтч. Объем электроэнергии, потребляемой электролизером в 2 раза меньше объема потребления основной нагрузки.

Для СЭС с установленной мощностью солнечных модулей 10 МВт объем генерации за месяц равен 984 МВтч, нагрузки потребляют 556 МВтч. Дефицит генерации наблюдается 7 дней, объем генерации резервной электростанции составил 82 МВтч или 16 % от объема потребления. При подключении электролизеров балластная нагрузка принимает 510 МВтч, примерно столько же, что и основная нагрузка. Графики зависимостей представлены на рис. 2.

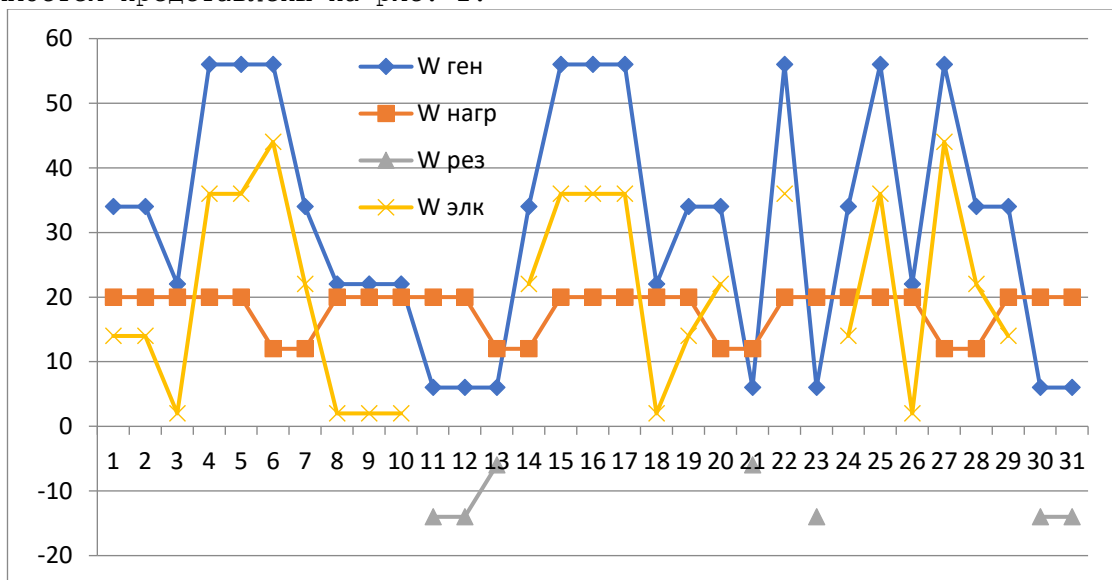


Рисунок 2 – Режимы работы СЭС с мощностью 10 МВт

Максимально возможный объем генерации электроэнергии за месяц

$$W_{\text{мах}} = P \cdot t \cdot d = 10 \cdot 8 \cdot 31 = 2480 \text{ МВтч.}$$

Коэффициент использования установленной мощности

$$K_{\text{исп}} = W_{\text{потр}} / W_{\text{макс}} = (556 - 82) / 2480 = 0,19 = 19 \%$$

При подключении электролизеров объем потребления увеличится

$$K_{\text{исп}} = W_{\text{потр}} / W_{\text{макс}} = (556 - 82 + 510) / 2480 = 0,40 = 40 \%$$

Число дней включения резервной электростанции снизилось с 13 до 7, объем электроэнергии, вырабатываемой дизель-электростанцией, равен 82 МВтч. Коэффициент использования мощности СЭС с электролизером увеличился в 2 раза, эффективность СЭС существенно возрастает. Улучшение стабильности работы напрямую коррелирует с увеличением ресурса технологического оборудования СЭС. Инверторы, функционирующие в сглаженном режиме, подвергаются меньшему количеству термических циклов, что замедляет процессы деградации силовых модулей и конденсаторов. Эксплуатационные данные указывают на снижение частоты профилактических отключений и уменьшение затрат на техническое обслуживание.

Важным аспектом эффективности системы является алгоритм управления СЭС с аккумуляторами и электролизером [5]. Базовые стратегии, основанные исключительно на текущих значениях мощности, обеспечивают уровень стабилизации потребляемой мощности. Наилучшие результаты достигаются при внедрении адаптивных подходов, учитывающих краткосрочный прогноз инсоляции. Аккумуляторные батареи способны поглощать избыточную мощность в пределах их емкости и степени зарядки.

Прогнозирование изменений облачности на горизонте от пятнадцати до тридцати минут позволяет системе заранее адаптировать потребляемую мощность, избегая запаздывания и избыточного регулирования. Подобная адаптивность особенно востребована в регионах с высокой метеорологической изменчивостью, где традиционные методы управления часто оказываются недостаточно эффективными [5].

Таким образом, интеграция электролизера в структуру СЭС демонстрирует выраженный стабилизирующий эффект в условиях переменной инсоляции. Способность электролизера поглощать избыточную мощность и сглаживать изменение нагрузки обеспечивает снижение колебаний напряжения в шинах постоянного тока. Уменьшение

числа дней с недостаточной генерацией и питание нагрузок от резервной электростанции повышает надежность энергосистем.

Применение адаптивных стратегий управления, учитывающих краткосрочные метеорологические прогнозы, дополнительно усиливает устойчивость системы и оптимизирует режимы работы [6]. Совокупность технических, эксплуатационных и экономических преимуществ подтверждает целесообразность внедрения электролизеров в качестве управляемых балластных нагрузок, что открывает новые возможности для повышения надёжности солнечных электростанций и их гармоничной интеграции в современные энергосистемы.

**Выводы:**

1. Рост числа и мощности солнечных модулей приводит к снижению числа дней дефицита генерации в энергосистеме. Объем электроэнергии, вырабатываемой резервной электростанцией, также снижается.

2. Увеличение числа и мощности солнечных модулей дает снижение коэффициента использования установленной мощности. Избыточная мощность солнечных панелей не используется.

3. Вследствие нестабильных погодных условий перерывы электроснабжения потребителей будут наблюдаться даже при избыточной мощности СЭС в 10 – 15 раз. Для летнего времени число дней простоя составит 6-7, для зимнего периода устойчивость энергосистемы на основе СЭС резко снижается даже при избыточной мощности. Устойчивая работа энергосистемы без резервной электростанции в принципе невозможна.

4. Подключение электролизеров в качестве балластной нагрузки позволяет полностью использовать мощность генерации СЭС, коэффициент использования установленной мощности возрастает в 2 – 3 раза. Однако при избыточной мощности генерации СЭС объемы потребления электроэнергии электролизерами превышают объемы потребления основной нагрузки.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ Р 58383 2019. Системы фотоэлектрические. Требования к подключению к распределительным сетям. – М.: Стандартинформ, 2019. – 24 с.
2. ГОСТ Р 58406.1 2020. Системы электролизные для производства водо-рода. Часть 1. Общие технические требования. – М.: Росстандарт, 2020. – 31 с.
3. Безруких, П.П. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы / П.П. Безруких. – М.: Инфра М, 2021. – 312 с.
4. Козлов, Д.А. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях с возобновляемыми источниками / Д.А. Козлов. – СПб.: Политехника, 2020. – 248 с.
5. Петров, К.С. Адаптивное управление гибридными системами «СЭС-электролизер» в условиях неопределённости инсоляции / К.С. Петров, Л.А. Морозова // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Возобновляемая энергетика: инновации и перспективы». – М.: МЭИ, 2023. – С. 145-152.
6. Иванов, А.В. Возобновляемые источники энергии: современные технологии и экономика / А.В. Иванов, С.Н. Петров. – М.: Энергоатомиздат, 2022. – 384 с.

УДК 654.022

**Карпов<sup>1</sup> Д.В., Казыбаев<sup>2</sup> А.М., Даргерхан<sup>3</sup> А.Х.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ СВЯЗИ MESHTASTIC ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ОПОВЕЩЕНИЯ ГРАЖДАН**

**Аннотация.** Рассматриваются перспективы применения систем Meshtastic при оперативном оповещении граждан в условиях ограниченной или нестабильной работы традиционных каналов связи. Особое внимание уделяется сценарию «беспилотной опасности», при котором своевременность передачи информации играет критическую роль, а существующие SMS-оповещения демонстрируют значительные задержки или полную недоступность сообщений. Анализируются принципы работы mesh-сетей на базе LoRa, их преимущества, включая децентрализацию, устойчивость к отказам и независимость от интернет-инфраструктуры. Рассматриваются архитектурные подходы к построению системы оповещения, вопросы надёжности передачи данных, энергопотребления, а также аспекты информационной безопасности. Делается вывод о целесообразности интеграции Meshtastic в существующие системы гражданского оповещения для повышения их эффективности и устойчивости в чрезвычайных ситуациях.

**Ключевые слова:** Meshtastic, mesh-сети, LoRa, система оповещения, беспилотная опасность, децентрализованные сети, передача данных, чрезвычайные ситуации, отказоустойчивость, радиосвязь, интернет-ограничения

**Karpov<sup>1</sup> D.V., Kazybaev<sup>2</sup> A.M., Dargerkhan<sup>3</sup> A.H.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

## **APPLICATION OF MESHTASTIC AUTONOMOUS COMMUNICATION SYSTEM FOR PROMPT NOTIFICATION OF CITIZENS**

**Abstract.** This article examines the prospects of applying Meshtastic technology in public alerting systems under conditions of limited or unstable operation of traditional communication channels. Particular attention is given to the scenario of "drone threat," where the timeliness of information delivery is critical, and existing SMS-based alerts often experience significant delays or complete non-delivery. The principles of mesh networks based on LoRa are analyzed, along with their advantages, including decentralization, fault tolerance, and independence from internet infrastructure. Architectural approaches to building an alerting system are discussed, as well as issues of data transmission reliability, energy consumption, and information security. The study concludes that integrating Meshtastic into existing public alerting systems is advisable to enhance their efficiency and resilience in emergency situations.

**Keywords:** Meshtastic, mesh networks, LoRa, alerting system, drone threat, decentralized networks, data transmission, emergency situations, fault tolerance, radio communication, internet limitations

Применение Meshtastic в системе оповещения граждан становится всё более актуальной темой на фоне роста угроз, связанных с использованием беспилотных летательных аппаратов, а также нестабильности традиционных каналов связи в условиях чрезвычайных ситуаций. Современные системы оповещения в большинстве стран опираются на централизованные инфраструктуры: сотовые сети, интернет, телевидение и радиовещание. Однако практика показывает, что именно в критические моменты эти системы оказываются перегруженными или частично недоступными. Особенно это проявляется при сценариях, связанных с массовыми угрозами, такими как так называемая «беспилотная опасность», когда требуется максимально быстрое и локализованное информирование населения.

Система Meshtastic представляет собой децентрализованную сеть передачи данных, построенную на основе технологии LoRa (Long Range). Она позволяет устройствам обмениваться сообщениями напрямую друг с другом, формируя mesh-сеть, в которой каждый узел может ретранслировать сообщения. Это принципиально отличает её от традиционных систем связи, где данные передаются через центральные серверы или базовые станции. В условиях, когда интернет отсутствует или ограничен, Meshtastic сохраняет работоспособность, что делает её перспективным инструментом для систем гражданского оповещения.

Ключевым преимуществом Meshtastic является независимость от инфраструктуры операторов связи. Для работы сети достаточно наличия устройств с поддержкой LoRa и соответствующего программного обеспечения. Радиус действия одного узла может достигать нескольких километров в городской застройке и десятков километров в открытой местности. При этом за счёт ретрансляции сообщений через промежуточные узлы зона покрытия может существенно расширяться. Таким образом, сеть способна функционировать даже при полном отсутствии централизованной связи.

Особое значение это приобретает при оповещении о беспилотной опасности. Такие угрозы характеризуются высокой динамичностью: беспилотные аппараты могут быстро менять направление движения, появляться внезапно и действовать на малых высотах. В подобных условиях критически важна скорость передачи информации. Традиционные

SMS-рассылки, используемые в системах оповещения, часто сталкиваются с задержками из-за перегрузки сети. В некоторых случаях сообщения приходят спустя десятки минут или не доходят вовсе.

Meshtastic, напротив, позволяет организовать распространение сообщений по принципу «от узла к узлу» без участия центральных серверов. Это означает, что информация о беспилотной угрозе может распространяться практически мгновенно среди пользователей сети в пределах зоны покрытия. Более того, сообщения могут передаваться с приоритетом, обеспечивая доставку важной информации в первую очередь.

Ещё одним важным аспектом является устойчивость к частичным отказам сети. В централизованных системах выход из строя ключевого элемента (например, базовой станции или сервера) может привести к полной потере связи в регионе. В mesh-сети Meshtastic отказ отдельных узлов не приводит к разрушению всей сети: маршруты передачи данных автоматически перестраиваются, используя доступные узлы. Это обеспечивает высокую живучесть системы в условиях дестабилизации инфраструктуры.

При проектировании системы оповещения на базе Meshtastic необходимо учитывать особенности распространения радиосигнала в диапазоне LoRa. В городской среде сигнал может ослабляться из-за плотной застройки, что требует более плотного размещения узлов. В сельской местности, напротив, возможно покрытие больших территорий с меньшим числом устройств. Важную роль играет размещение узлов на возвышенностях, крышах зданий или мачтах, что позволяет увеличить дальность связи и улучшить устойчивость сети.

Для реализации системы оповещения на базе Meshtastic может использоваться следующая архитектура. В ключевых точках города или региона размещаются стационарные узлы, выполняющие роль ретрансляторов. Они обеспечивают базовую инфраструктуру сети. Дополнительно пользователи могут иметь персональные устройства – портативные радиомодули или смартфоны с подключёнными LoRa-устройствами. В случае обнаружения угрозы сообщение может быть отправлено как от централизованного источника (например, службы мониторинга), так и от отдельных пользователей, если система предусматривает такой функционал.

Важно отметить, что децентрализованный характер сети открывает возможность для реализации краудсорсинговых механизмов оповещения. Пользователи могут сообщать о замеченных беспилотниках, передавая координаты и описание. Эти данные могут агрегироваться и распространяться по сети, формируя более полную картину происходящего. Однако такой подход требует внедрения механизмов верификации информации, чтобы избежать распространения ложных сообщений.

Ограничения интернета, которые часто сопровождают чрезвычайные ситуации, также делают Meshtastic актуальным, он не требует интернет-доступа, сохраняет функциональность в таких условиях. При этом при наличии интернета сеть может интегрироваться с внешними системами, например, через шлюзы, обеспечивая двусторонний обмен данными.

Одним из вызовов при внедрении Meshtastic в системы гражданского оповещения является обеспечение безопасности и защиты информации. Поскольку сеть является открытой и децентрализованной, существует риск перехвата или подделки сообщений. Для решения этой проблемы используются механизмы шифрования и аутентификации. Важно обеспечить, чтобы сообщения от официальных источников могли быть однозначно идентифицированы пользователями. Это может достигаться за счёт использования цифровых подписей и доверенных ключей.

Также следует учитывать вопросы энергопотребления устройств. Одним из преимуществ LoRa является низкое энергопотребление, что позволяет узлам работать от батарей в течение длительного времени. Это особенно важно для автономных ретрансляторов, размещённых в труднодоступных местах. В условиях чрезвычайной ситуации, когда электроснабжение может быть нарушено, автономность устройств становится критическим фактором.

Практическая реализация системы оповещения на базе Meshtastic требует нормативного и организационного обеспечения. Необходимо определить порядок использования радиочастот, регламентировать взаимодействие между различными службами, а также обеспечить обучение населения. Пользователи должны понимать, как работают устройства, как получать и интерпретировать сообщения, и какие действия предпринимать при получении уведомления о беспилотной опасности.

#### **Заключение**

Таким образом, Meshtastic представляет собой перспективное дополнение к традиционным системам оповещения граждан. Его ключевые преимущества – децентрализация, устойчивость к отказам, независимость от интернета и сотовых сетей – делают его полезным в условиях чрезвычайных ситуаций. В контексте оповещения о

беспилотной опасности, где критически важны скорость и надёжность передачи информации, использование mesh-сетей может существенно повысить уровень безопасности населения. При этом для эффективного внедрения необходимо учитывать технические, организационные и социальные аспекты, обеспечивая комплексный подход к построению системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meshtastic Project. Meshtastic Documentation [Электронный ресурс].
2. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things // Sensors. – 2016. – Vol. 16(9)..
3. Васильев И. А. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2021. – 512 с.
4. Афанасьев В. Н. Теория управления техническими системами. – М.: Наука, 2019. – 432 с.
5. Перминов В.А., Кузнецов С.Н. Системы оповещения населения при чрезвычайных ситуациях. – М.: Техносфера, 2020.
6. Гришко, А. К. Построение эффективной системы радиоэлектронных средств на основе анализа полумарковской модели обеспечения электромагнитной совместимости / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 4. – С. 18-25. – EDN YUDMYS.
7. Mathematical Models of the System of Measurement and Analysis of Temperature Parameters of Radio Electronic Modules / A. K. Grishko, N. V. Goryachev, I. I. Kochegarov, M. P. Kalaev // 13th international scientifictechnical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE - 2016) : Proceedings: in 12 volumes, Novosibirsk, 03-06 октября 2016 года. Vol. Volume 1, Part 2. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – P. 112-115. – DOI 10.1109/APEIE.2016.7806424. – EDN WZWLZT.
8. Contactless three-component measurement of mirror antenna vibrations / A. V. Grigor'ev, A. K. Grishko, N. V. Goryachev [et al.] // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings, Moscow, 12-14 мая 2016 года. – Moscow, 2016. – P. 7491673. – DOI 10.1109/SIBCON.2016.7491673. – EDN WTEYYL.
9. Мельничук, А. И. К проблеме синтеза многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов / А. И. Мельничук, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 3(39). – С. 33-41. – DOI 10.21685/2307-4205-2022-3-4. – EDN GPQOJN.
10. Горячев, Н. В. Индикатор обрыва предохранителя как элемент первичной диагностики отказов РЭА / Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2010. – Т. 2. – С. 78-79. – EDN NDKUCB.

УДК 621.314

**Грачев<sup>1</sup> А.Н., Саушев<sup>2</sup> А.В., Шичкин<sup>3</sup> Н.С., Архипов<sup>4</sup> Д.Д.**

<sup>1,2,3,4</sup> Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> grachev8383@mail.ru

<sup>2</sup> saushev@bk.ru

<sup>3</sup> shichkin.nikitosha@yandex.ru

<sup>4</sup> digital5563@icloud.com

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАРТОНОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОТНА И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы экспериментального исследования процесса натяжения картонного полотна электропривода картоноделательной машины. Произведены испытания образцов картонного полотна на участках его формирования. Произведен контроль обрывности картонного полотна относительно секций машины. Показано, что основной процент обрывности полотна наблюдается в ее сушильной части. Установлено, что изменение физико-механических свойств картонного полотна в процессе сушки существенно влияет на натяжение полотна между секциями машины. Экспериментально получены осциллограммы линейных скоростей и моментов электродвигателей отдельных секций, а также количественные данные о натяжении полотна на каждой из этих секций.

**Ключевые слова:** модель натяжения, картоноделательная машина, контур натяжения полотна, электропривод, осциллограммы скоростей и моментов

**Grachev<sup>1</sup> A.N., Saushev<sup>2</sup> A.V., Shichkin<sup>3</sup> N.S., Arkhipov<sup>4</sup> D.D.**

<sup>1,2,3,4</sup> Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> grachev8383@mail.ru

<sup>2</sup> saushev@bk.ru

<sup>3</sup> shichkin.nikitosha@yandex.ru

<sup>4</sup> digital5563@icloud.com

### **EXPERIMENTAL STUDY OF AN ELECTRIC DRIVE CARDBOARD MAKING MACHINE FOR THE PURPOSE OF EVALUATION WEB TENSION AND QUALITY IMPROVEMENT TECHNOLOGICAL PROCESS**

**Abstract.** The issues of experimental investigation of the process of tension of the cardboard web of the electric drive of the cardboard-making machine are considered. Samples of cardboard cloth were tested at the sites of its formation. The breakage of the cardboard sheet relative to the sections of the machine was controlled. It is shown that the main percentage of breakage of the web is observed in its drying part. It is established that the change in the physico-mechanical properties of the cardboard cloth during the drying process significantly affects the tension of the cloth between the sections of the machine. Oscillograms of linear velocities and torques of electric motors of individual sections, as well as quantitative data on the tension of the web on each of these sections, were experimentally obtained.

**Keywords:** tension model, cardboard making machine, fiber tension contour, electric drive, oscillograms of velocities and moments

В процессе производства картона необходимо поддерживать стабильность натяжения полотна между связанными между собой секциями картоноделательной машины (КДМ) через вырабатываемое картонное полотно [1].

Отсутствие необходимого натяжения картонного полотна между секциями КДМ недопустимо, так как это ведет к обрыву картонного полотна, или к образованию петель и складок. Поддержание постоянства натяжения картонного полотна достигается регулированием скорости между секциями при неизменной линейной скорости КДМ [2]. Измерение натяжения полотна посредством установки датчика натяжения не всегда представляется возможным, поскольку полотно картона на многих участках недостаточно сформировано, да и конструктивная особенность не позволяет использовать данный метод. В этой связи в статье [3] рассматривалось применение косвенного метода, основанного на определении разницы скоростей текущей и предыдущей секции.

Во время транспортировки картонного полотна (рис. 1), технологические процессы, проходящие в разных участках КДМ, определяют формирование разницы скоростей между смежными секциями [4]. Особенно ощутимо влияние процесса обезвоживания картонного полотна на участке сушильных групп (СГ).



Рисунок 1 – Структура привода КДМ

Для решения задачи поддержания стабильности натяжения полотна между связанными между собой секциями необходимо иметь математическое описание технологического процесса работы КДМ. Для разработки математической модели КДМ необходимо обладать информацией о параметрах электромеханической системы (ЭМС). Существующее прикладное программное обеспечение, реализованное в системе управления электроприводом КДМ, дает возможность визуализации и фиксации параметров ЭМС: линейная скорость машины, ток и угловая скорость электродвигателя, опережение секции и т.д. Измерение силы натяжения полотна между секциями не представляется возможным в связи с отсутствием возможности установки необходимых датчиков.

С помощью автоматизированного комплекса SCADA реализован мониторинг и управление технологическими процессами. Производится сбор информации о параметрах контролируемого технологического процесса с использованием сенсоров (датчиков), контрольно-измерительной аппаратуры и других устройств. Для решения задачи получения информации о динамике текущих параметров ЭМС привода КДМ необходимо провести анализ комплексно, с учетом влияния параметров технологического процесса.

В результате натурных экспериментов был произведен контроль обрывности картонного полотна относительно секций КДМ. Результаты обработки полученных данных представлены на рис.2, из которого следует, что основной процент обрывности полотна наблюдается в сушильной части КДМ, а именно в межсекционных промежутках 1-2 сушильной группы и 4-5 сушильной группы.

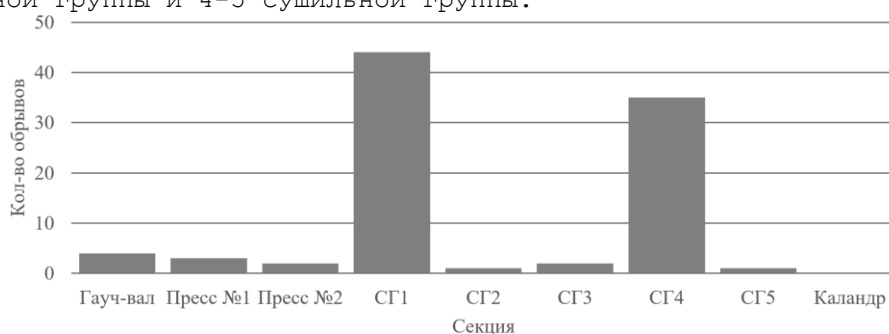


Рисунок 2 – Обрывность картонного полотна относительно секций

Удалось установить, что имеет место высокий процент обрывности в крайних зонах сушильной части, обусловленный периодами сушки. Учитывая массу вырабатываемого картона (430 г/м<sup>2</sup>) можно утверждать, что межсекционный промежуток 1-2 сушильной группы соответствует этапу перехода от периода подогрева, в течение которого картон нагревают до температуры испарения воды, к периоду постоянной сушки (периоду постоянной скорости сушильного процесса) [5], в котором убыль влаги с наружной поверхности картона компенсируется внутренней диффузией.

В межсекционных промежутках 4-5 сушильной группы также наблюдается соответствие этапу перехода от первого периода ко второму периоду (периоду падающей скорости сушильного процесса), в котором из-за недостатка воды в картоне внутренняя диффузия не может уже восполнить убыль влаги на наружной поверхности высушиваемого картона.

В период подогрева (первая стадия сушки) волокно покрыто пленкой жидкости, и до сухости около 55 % сцепление между волокнами в бумаге обусловлено в основном силами трения. В период постоянной сушки (вторая стадия сушки), при сухости бумажного полотна выше 60 %, свободная влага с поверхности волокон исчезает, но еще остается во внутренних капиллярах, начинается формирование водородных связей между волокнами [6]. В период падающей скорости сушки (третья стадия), при сухости картонного полотна выше 75 %, удаляется связанная влага, оставшаяся в стенках волокон и в микрокапиллярах, начинается усадка самих волокон, а следовательно, и картонного полотна, и заканчивается формирование межволоконных связей.

Таким образом, изменение физико-механических свойств картонного полотна в процессе сушки [7], объясняемое теорией усадки, существенно влияет на натяжение полотна между секциями. На рис. 3 представлены осциллограммы линейных скоростей и моментов двигателей СГ1 (секция №4) и СГ2 (секция №5). Они получены при транспортировке картонного полотна по секциям сушильной части КДМ.

В период времени  $t_1$  моменты обоих электроприводов остаются неизменными. В интервале от  $t_1$  до  $t_2$  происходит едва заметное уменьшение момента ЭД СГ1 и незначительный рост момента ЭД СГ2. В период времени от  $t_2$  до  $t_3$  происходит обрыв картонного полотна. Принимая во внимание факт, что мощность, затрачиваемая на перемещение и удлинение картонного полотна в момент транспортировки, по срав-

нению со всей мощностью, потребляемой КДМ, незначительна, а сопротивление разрывному усилию на данном участке минимально из-за слабых межволоконных связей (большая влажность), можно полагать, что моментобразующие переходные процессы не существенно отражают межсекционное натяжение полотна на данном участке.

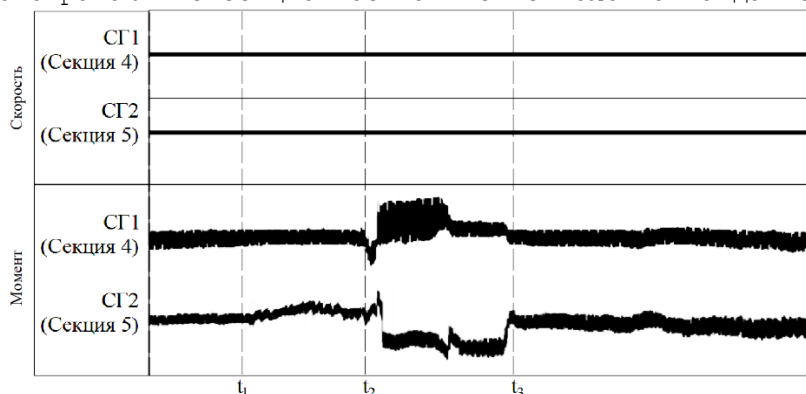


Рисунок 3 – Осциллограмма скоростей и моментов двигателей СГ1-2

В момент проводки полотна скорости обоих электроприводов остаются неизменными. Вместе с тем следует отметить, что при визуальном и тактильном наблюдении, в переходных процессах отслеживается и слабое межсекционное натяжение полотна – происходит механическое колебание полотна, и чрезмерное натяжение – полотно картона натянуто с некоторым напряжением. Кроме этого, в начале процесса сушки происходит обильное удаление воды, картонное полотно на данном участке имеет повышенную влажность и не может значимо противостоять разрывной силе [8]. Предполагается, что причины обрывности на данном участке обусловлены повешением температуры, скорости сушки и слабыми межволоконными связями.

На рис. 4 представлены осциллограммы линейных скоростей и моментов двигателей СГ4 (секция №7), СГ5 (секция №8) и каландра (секция №9). Очевидно, что на данных участках завершаются процессы образования межволоконных связей и следовательно картонное полотно имеет повышенные прочностные характеристики.

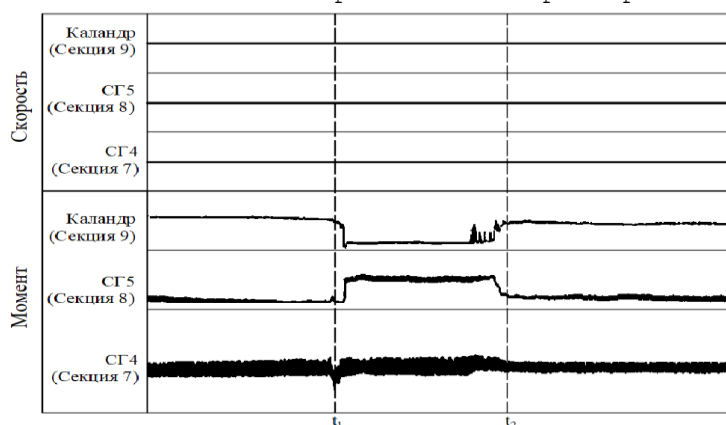


Рисунок 4 – Осциллограмма скоростей и моментов двигателей СГ4-5, каландра

Транспортировка картонного полотна осуществляется с большей силой натяжения. Об этом свидетельствует интервал от  $t_1$  до  $t_2$ , в котором, после обрыва полотна (момент времени  $t_1$ ), наблюдается незначительный рост момента ЭД СГ4 и более значительный рост момента ЭД СГ5, а ЭД каландра показывает падение момента. В момент обрыва полотна колебаний скорости ЭД СГ4-5 и каландра не выявлено.

Представленные данные свидетельствуют о чрезмерном натяжении картонного полотна на участке каландра (секция №9), что приводит к уменьшению момента ЭД СГ5 (секция №8) и не значительному уменьшению момента СГ4 (секция №7) при проводке полотна.

Предполагается, что данное не корректное натяжение полотна вызвано не только следствием ранее установленной разности скоростей секций (основная причина), но и усадкой полотна. В наибольшей степени усадка волокон полотна происходит при сухости выше 80 % [9], что соответствует межсекционному промежутку 4-5 сушильной группы, согласно установленной зависимости влажности полотна от секции КДМ. Очевидно, что при сушке с волокнами происходят необратимые изменения. Особенно это заметно при пересушке картона. Волокна такого картона становятся хрупкими и упругие свойства снижаются.

На рис. 5 представлены осциллограммы линейных скоростей и моментов двигателей СГ4 (секция №7), СГ5 (секция №8) и каландра (секция №9).



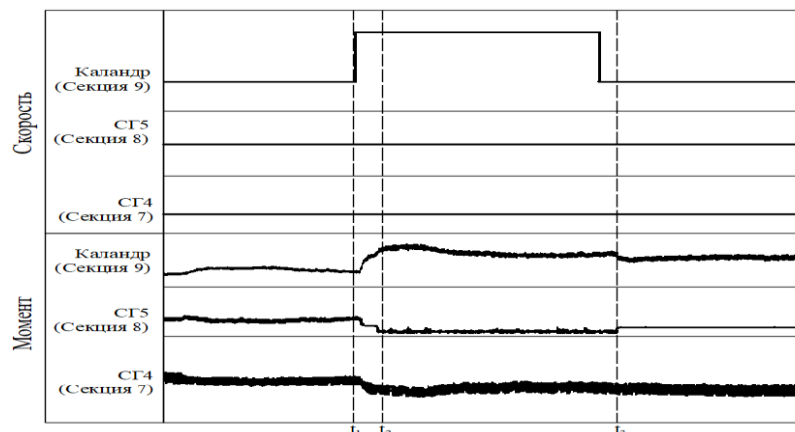


Рисунок 5 – Осциллограмма скоростей и моментов двигателей СТ4-5, каландра

Приведенные графики показывают увеличение момента ЭД каландра в результате ручной корректировки скорости секций каландра (в момент времени  $t_1$ ) для обеспечения необходимого натяжения полотна. Вследствие чего в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$  происходит потеря момента ЭД предшествующей перед ним секции СТ5 и уменьшение момента ЭД СТ4. Данный факт указывает на то, что произошло перераспределение нагрузки в результате натяжения полотна относительно секции каландра. Далее, в момент времени  $t_2$ , ЭД СТ5 переходит в генераторный режим и создает дополнительную нагрузку, что в дальнейшем ведет к отключению ЭД данной группы (момент времени  $t_3$ ).

Описанные выше переходные процессы (рис. 5) вызваны в первую очередь необходимостью увеличить силу натяжения для поддержания устойчивости движения полотна по данным секциям КДМ без образования коробления из-за механических дефектов нелинейности сушильных групп машины [1]. Требуемое натяжение картонного полотна между секциями поддерживается путем регулирования относительных скоростей секций [10]. При передаче бумажного полотна с одной секции на другую нарушается проводка бумажного полотна и при определенных условиях, изложенных выше, происходит обрыв бумажного полотна.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований ЭМС подтверждают необходимость более глубокого анализа физико-механических свойств транспортируемого картонного полотна для дальнейшей разработки модели натяжения, которая позволит синтезировать контур натяжения картонного полотна и обеспечить стабильность скорости электроприводов секций КДМ. При решении этих задач большое значение имеет выбор алгоритмов управления [11, 12] и учет требований к надежности электроприводов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грачев А.Н., Саушев А.В., Самосейко В.Ф., Шичкин Н.С. Совершенствование системы автоматического управления взаимосвязанными электроприводами картоноделательной машины КЗ-М // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. Вып. 7. С. 539 – 544.
2. Pramod R. Raul, Prabhakar R. Pagilla. Design and implementation of adaptive PI control schemes for web tension control in roll-to-roll (R2R) manufacturing. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2014.11.020>.
3. Грачев А.Н., Шичкин Н.С., Самосейко В.Ф., Саушев А.В. Модель натяжения полотна картоноделательной машины // Труды международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2 т. Т. 1– Пенза: ПГУ, 2025. С. 285 – 289.
4. Барышников В.Д., Куликов С.Н. Автоматизированные машины бумагоделательного производства. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1982. 144 с.
5. Войков Л.М. Совершенствование процессов контактно-конвективной сушки картона и бумаги: диссертация доктора технических наук: 05.14.04, 05.21.03. Санкт-Петербург, 2001. 422 с.
6. Казаков Я.В., Воробьева Т.В., Хромцова Р.Г. Формирование характеристик вязкоупругости целлюлозно-бумажных материалов в процессе сушки. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова // ИВУЗ. «Лесной журнал». 2013. № 5. с. 184–192.
7. Markku Karlsson. Papermaking science and technology. Papermaking Part 2, Drying. Book 9, Drying Fapet Oy, Finland, 2000. Vol. 9. 496 p.
8. Апсит С.О., Килипенко А.В. Бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 88 с.
9. Дулькин Д.А., Южанинова Л.А., Миронова В.Г., Спиридонов В.А.. Научные основы переработки макулатуры // ИВУЗ. «Лесной журнал». 2005. № 1–2. с. 104–123.
10. Санников А.А., Гилев А.Ю., Куцубина Н.В., Исаков С.Н. Влияние вибрации измерительных валиков системы управления скоростями секций бумагоделательных машин на обрывность бумажного полотна // Современные проблемы науки и образования. № 6. 2014.
11. Ализода М.М. Роль принятия решений при управлении сложными системами // Труды международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2 т. Т. 1– Пенза: ПГУ, 2024. С. 147 – 148.
12. Юрков Н.К., Вецков А.В., Самокутяев А.М. Мультиагентное управление сложными динамическими системами // Труды международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2 т. Т. 1– Пенза: ПГУ, 2023. С. 6 – 12.

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДА SHAPE-FROM-SHADING НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ГРАДИЕНТА ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОРФОЛОГИИ УЧАСТКА ПОВЕРХНОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ**

**Аннотация.** Рассматривается методика восстановления морфологии поверхности участка микроэлектронной структуры по одиночному изображению с использованием подхода shape-from-shading на основе оценки градиентов яркости. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения затрат на измерительное оборудование и сокращения времени контроля качества поверхности на этапах технологической обработки. Целью работы является методологическая проверка применимости данного подхода для восстановления формы микроповерхностей. В качестве исходных данных используется оптическое изображение поверхности после травления, представленное в градациях серого и описываемое в рамках ламбертовской модели отражения при нормальном падении света. Восстановление функции высот осуществляется посредством вычисления градиентов яркости с последующим решением уравнения Пуассона в частотной области. Верификация результатов проводится путём сравнения с эталонной картой высот, полученной с использованием лазерного профилометра Mitaka PF-60. Качество восстановления оценивается с применением метрик RMSE, MAE, коэффициента корреляции Пирсона и индекса структурного сходства SSIM. Полученные результаты показывают, что рассматриваемый подход обеспечивает удовлетворительное восстановление гладких участков рельефа поверхности, однако характеризуется повышенной чувствительностью к условиям формирования исходного изображения и принятым модельным допущениям. Установлено, что метод может применяться для приближённой оценки формы поверхности на уровне макрорельефа при соблюдении ограничений используемой модели. Представленные результаты рассматриваются как начальный этап дальнейших исследований, направленных на восстановление и анализ микроструктуры поверхности с использованием более точных интерференционных методов, в частности спекл-интерферометрии.

**Ключевые слова:** shape-from-shading, ламбертовская модель, градиенты изображения, уравнение Пуассона, профилометр, RMSE, MAE, Pearson, SSIM

**Ershov<sup>1</sup> D.V., Dmitriev<sup>2</sup> S.V., Semenov<sup>3</sup> A.D.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> daniilershov2001@gmail.com

<sup>2</sup> serezha.dmitriev.01@mail.ru

<sup>3</sup> ad-semenov@mail.ru

## **IMPLEMENTATION OF THE SHAPE-FROM-SHADING APPROACH BASED ON IMAGE GRADIENT ESTIMATION TO RESTORE THE MORPHOLOGY OF A MICROSTRUCTURE SURFACE AREA**

**Abstract.** Background. The paper considers a technique for reconstructing the morphology of the surface of a section of a microelectronic structure from a single image using the shape-from-shading approach based on the estimation of brightness gradients. The relevance of the study is due to the need to reduce the cost of measuring equipment and reduce the time for surface quality control at the stages of technological development. The aim of the work is to methodologically verify the applicability of this approach to reconstruct the shape of micro-surfaces. Materials and methods. The initial data is an optical image of the surface after etching, presented in grayscale and described in the framework of the Lambert model of reflection at normal incidence of light. The height function is restored by calculating brightness gradients followed by solving the Poisson equation in the frequency domain. The results are verified by comparison with a reference elevation map obtained using a Mitaka PF-60 laser profilometer. The quality of recovery is assessed using the RMSE, MAE, Pearson correlation coefficient, and SSIM Structural Similarity Index metrics. Results. The results obtained show that the considered approach provides satisfactory restoration of smooth sections of the surface relief, however, it is characterized by increased sensitivity to the conditions of formation of the initial image and accepted model assumptions. Conclusions. It is established that the method can be used to approximate the shape of the surface at the level of the macrorelief while observing the limitations of the model used. The presented results are considered as the initial stage of further research aimed at restoring and analyzing the microstructure of the surface using more accurate interference methods, in particular speckle interferometry.

**Keywords:** shape-from-shading, Lambert model, image gradients, Poisson's equation, profilometer, RMSE, MAE, Pearson, SSIM

### **Введение**

Восстановление трёхмерной формы объектов по двумерным изображениям важная задача компьютерного зрения и микроскопии, применяемая в контроле качества, микроэлектронике и материаловедении. В частности, задачи контроля шероховатости и микрорельефа поверхности обычно решаются с помощью контактных или лазерных профилометров, однако эти методы сложны и не всегда доступны. Мотивацией данного исследования является проверка возможности оценки морфологии поверхности микроэлектронного образца по одиночному изображению с помощью метода shape-from-shading (SFS) [1-2]. В настоящей работе рассматривается реализация такого метода с верификацией полученных результатов на данных лазерного профилометра

Mitaka PF-60 [3]. Основная цель заключается в методологической проверке применимости SFS для микроповерхностей и количественная оценка точности реконструкции.

*Методика восстановления формы*

*Подготовка изображения.* Исходное оптическое изображение участка микроструктуры переводится в градации серого. Затем оно нормализуется в диапазоне и масштабируется к фиксированному разрешению. На этой стадии также убираются сильные блики и шум, если они присутствуют [4]. В данной работе предположено, что освещение практически перпендикулярно поверхности, ламбертовское, а specularные отражения пренебрежимо малы. Геометрическая калибровка отсутствует, то есть используется ортографическая проекция, перспектива не учитывается.

*Оценка градиентов яркости.* Из подготовленного изображения  $I(x, y)$  по оси  $x$  и  $y$  вычисляются численные градиенты яркости с помощью оператора Собеля. Это даёт два массива  $p'(x, y), q'(x, y)$ , аппроксимирующих  $\partial I / \partial x$  и  $\partial I / \partial y$ . Затем эти градиенты фильтруются Гауссовым окном для подавления шума. Здесь аппроксимируется отношение  $\frac{\partial I}{\partial x} \approx \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$  и т.д., что справедливо при ламбертовской модели. В результирующих массивах  $p = q = 0$  на границах.

*Решение уравнения Пуассона (FFT).* После получения гладких градиентов  $p', q'$  вычисляется их дивергенция. Затем решается уравнение Пуассона [5] в частотной области. Для этого применяется двумерное быстрое преобразование Фурье. Получается приближённая карта высот поверхности, восстановленная на основе подхода SFS.

*Нормализация и выравнивание данных профилометра.* Далее восстановленная форма приводится к масштабу данных профилометра. Одновременно загружается эталонная матрица высот, полученная сканированием Mitaka PF-60. Эти данные также нормируются и выравниваются по размерам. В итоге сравниваются две поверхности одинакового размера.

*Метрики качества.* Для количественной оценки соответствия восстановленной поверхности к эталонной используется набор стандартных статистических и структурных метрик [6].

В качестве основной меры отклонения применяется среднеквадратичная ошибка (RMSE), характеризующая средний уровень расхождения между значениями высот на всей поверхности. Дополнительно рассчитывается средняя абсолютная ошибка (MAE), позволяющая оценить среднюю величину отклонения без учёта знака ошибки.

Для анализа степени линейной зависимости между восстановленной и эталонной поверхностями используется коэффициент корреляции Пирсона. Данная метрика отражает согласованность формы поверхностей независимо от их абсолютного масштаба.

Структурное сходство оценивается с использованием индекса SSIM, который учитывает различия в локальных средних значениях, контрасте и взаимной корреляции участков изображения. Значение SSIM лежит в диапазоне от 0 до 1, где единице соответствует полное совпадение структур.

Использование указанных метрик позволяет комплексно оценить качество восстановления поверхности.

*Результаты эксперимента*

Объект исследования – фрагмент микроструктуры после травления (образец размером  $\sim 0.4 \times 0.35$  см). В данном случае была получена матрица высот размером  $400 \times 400$  точек. Разрешение профилометра по плоскости XY составляет 0.1 мкм, а разрешение по высоте 0.01 мкм. На практике полученная высота нормируется на диапазон  $[0, \sim 0.025$  мм], что характерно для высот микронной шероховатости на данном образце. Освещение для визуального снимка предполагалось направленным строго перпендикулярно к образцу, ортографическая проекция, ламбертовская модель. Specularные блики на изображении отсутствовали или минимальны, рассматриваются как шумовая погрешность. В таблице 1 приведены технические характеристики используемых приборов:

На рисунках 1–5 показаны: исходное изображение, графически восстановленная поверхность, эталон, а также карта ошибок и корреляционный график.

На рисунках 2 и 3 видно общее сходство форм, наиболее выдающиеся «бугры» и «впадины» на поверхности SFS рисунка 2 находятся в примерно тех же местах, что и у профилометра на рисунке 3. Метод SFS позволил восстановить крупную форму поверхности, иначе фоновые колебания рельефа с погрешностью порядка единиц микрометров (RMSE  $\sim 3 \times 10^{-3}$  мм).

Параметры экспериментальной установки

Таблица 1

| Параметр             | Характеристика                                                     |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Оптическая камера    | Монохроматическая, разрешение кадра $\geq 400 \times 400$          |
| Лазерный профилометр | Mitaka PF-60, диапазон XYZ 60 мм, резолуция XY=0.1 мкм, Z=0.01 мкм |
| Фрагмент платы       | Размер $\sim 4 \times 3.5$ мм, образец после травления             |
| Освещение            | Перпендикулярное (ламбертовское, без бликов)                       |
| Размер матрицы       | 400×400 точек                                                      |

После выполнения описанной методики были получены следующие результаты. В Таблице 2 приведены значения метрик качества в миллиметрах для RMSE и MAE, безразмерные для Pearson и SSIM, для полученного примера:

Метрики качества восстановления

Таблица 2

| Метрика | Значение |
|---------|----------|
| RMSE    | 0.166398 |
| MAE     | 0.119844 |
| Pearson | 0.5987   |
| SSIM    | 0.725    |

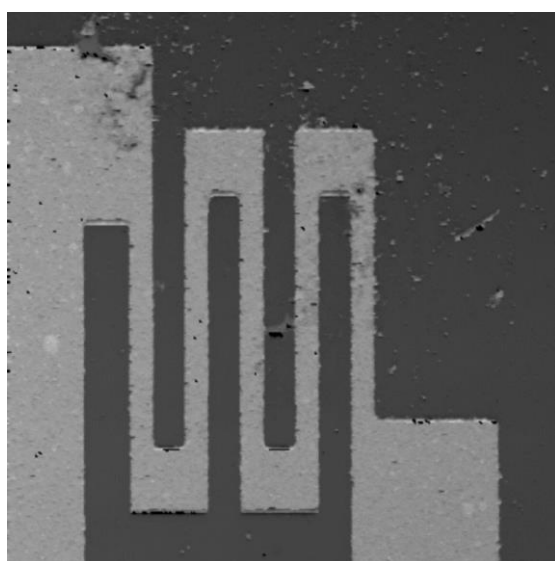


Рисунок 1 – Исходное изображение для восстановления

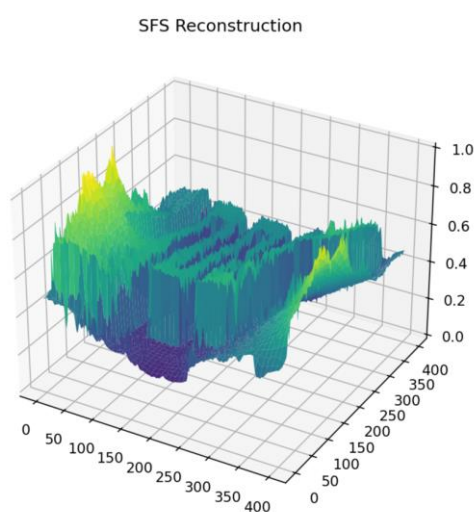


Рисунок 2 – Поверхность, восстановленная методом SFS (3D-график функции)

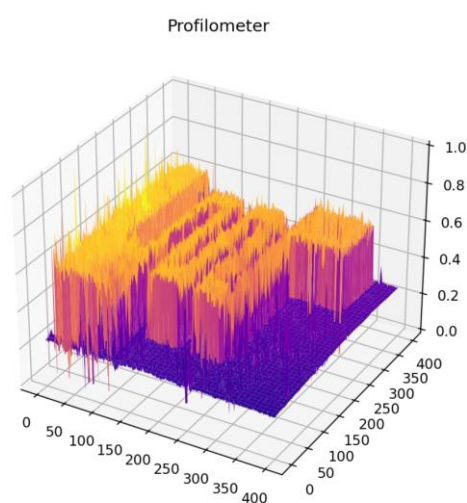


Рисунок 3 – Поверхность, измеренная профилометром (3D-график функции)

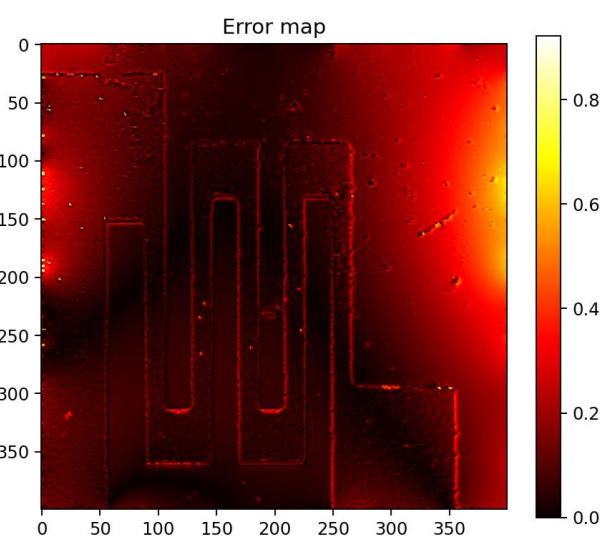


Рисунок 4 – Карта ошибок, тепловая карта разности поверхностей

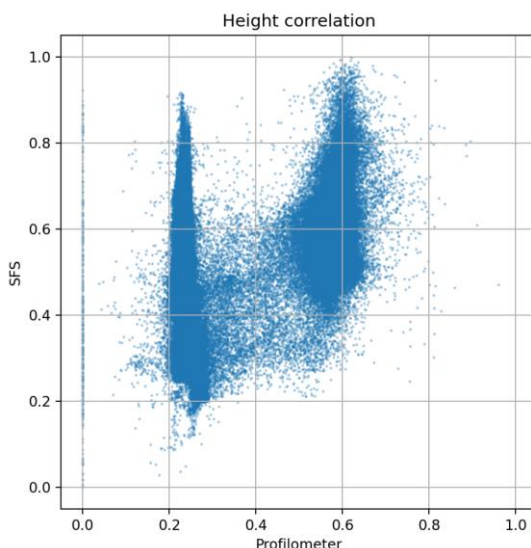


Рисунок 5 – Диаграмма разброса значений карт высот восстановленного и эталонного изображения

Значение SSIM говорит о частичном сохранении структуры рельефа, но неидеальном сходстве. Отрицательное отклонение и разброс точек на диаграмме рисунка 5 указывают на несоответствие деталей, SFS склонен занижать амплитуды выступов и впадин, иногда наблюдается инверсия рельефа в частных областях.

Коэффициент корреляции Пирсона менее 1 отражает, что хотя общая тенденция присутствует, множество пикселей имеют существенные отклонения. Это означает, что SFS хорошо восстанавливает глобальную форму, но теряет высокочастотные компоненты. Например, мелкие ямки или острые ребра почти не выявлены. Гауссово сглаживание на этапе градиентов дополнительно размывает детали. Тем не менее, присутствует корреляция, что при увеличении высоты в профилометре обычно наблюдается увеличение и в SFS результате, что видно по разбросу на рисунке 5.

В целом, метод восстановил форму поверхностного микрорельефа качественно, но с заметной невысокой точностью на мелких масштабах. Как правило, отмечено, что чем более гладкой является поверхность, тем более точен результат SFS, а на резких выступах/впадинах погрешность растёт. Эта зависимость типична и хорошо описана в литературе SFS [7].

#### Заключение

В данной работе продемонстрирована практическая реализация подхода SFS для восстановления морфологии микроструктуры по единственному изображению. Был реализован алгоритм по преобразованию изображения в серый цвет, получение градиентов оператором Собеля и их сглаживание, интегрирование градиентов через уравнение Пуассона методом FFT. Результат сопоставлен с высокоточным профилометром Mitaka PF-60. Эксперимент показал, что SFS способен восстановить базовый рельеф поверхности с умеренной точностью, однако не выявляет мелкие неровности и чувствителен к несоответствиям модели. Ключевые ограничения предложенного подхода указаны ниже.

**Модель освещения:** Предположена ламбертовская поверхность и свет из направления камеры. Если реальное освещение не соответствует (например, косой свет, неоднородность яркости), то оцененные градиенты будут ошибочны, и восстановление нарушается.

**Отсутствие калибровки.** Перспектива, искажения объектива камеры, а также масштаб сцены не учитываются. Геометрическая привязка к реальным единицам отсутствует, поэтому результата SFS имеет лишь относительную шкалу.

**Спекулярные отражения.** Любые блики или зеркальные участки на изображении будут сильно искажать яркость. В текущей работе такие блики допущено считать шумом.

**Гладкость поверхности.** Метод основан на решении гладкого дифференцируемого вариационного принципа. Мелкие детали, такие как острые углы и микротрещины плохо воспроизводятся, SFS склонен выдавать размытый рельеф.

Таким образом, настоящая работа является первым поисковым этапом в направлении пассивной оценки свойств поверхности по изображениям. Полученный опыт важен для дальнейшего развития методик 3D-реконструкции в инженерии микрорельефов. В дальнейшем планируется перейти к более точным методам, таким как спеклоинтер-

ферометрия [8], которые позволяют выявлять микротрещины и микродефекты поверхности с большей точностью. Также благодаря другим работам [9]. существует интерес замещения методов статической обработки изображения методами машинного обучения для более точного распознавания паттернов морфологии поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horn B.K.P. Восстановление формы по затенению: метод определения формы гладкого непрозрачного объекта по одному изображению. Massachusetts Institute of Technology, 1970.
2. Zhang R., Tsai P.-S., Cryer J.E., Shah M. Восстановление формы по затенению: обзор // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1999. Т. 21, № 8. С. 690-706.
3. PF-60 Промышленное оборудование Mitaka Kohki Co., Ltd. URL: <https://mitakakohki.co.jp/english/industry/pf/lineup/pf-60.html> (дата обращения: 05.05.2026).
4. Szeliski R. Компьютерное зрение: алгоритмы и приложения. London: Springer, 2010. 812 p.
5. Simchony T., Chellappa R., Shao M. Прямые аналитические методы решения уравнений Пуассона в задачах компьютерного зрения // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Т. 12, № 5. С. 435-446.
6. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Оценка качества изображений: от видимости ошибок к структурному сходству // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Т. 13, № 4. С. 600-612.
7. Frankot R.T., Chellappa R. Метод обеспечения интегрируемости в алгоритмах восстановления формы по затенению // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1988. Т. 10, № 4. С. 439-451.
8. Leendertz J.A. Интерферометрическое измерение перемещений на рассеивающих поверхностях с использованием спекл-эффекта // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1970. Т. 3. С. 214-218.
9. Никиткин А.С., Кузин А.В. Нейросетевая идентификация схемы замещения межэлектродного зазора при электроэрозионном профилировании шлифовальных кругов на токопроводящих связках // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2025 Т.2.

УДК 621.315.592

**Городецкий<sup>1</sup> Н.А., Жалнин<sup>2</sup> В.П., Жезло<sup>3</sup> Д.И., Шахнов<sup>4</sup> В.В.**

<sup>1,2,3,4</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> zhalnin@mail.ru

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

**Аннотация.** Представлен обзор современных методов улучшения электронных и оптических свойств МДП-структур и влияния этих методов на такие параметры современных полупроводниковых устройств, как пороговое напряжение, подвижность носителей заряда, токи утечки и ёмкость затвора. Основное внимание уделено способам снижения плотности дефектов, уменьшения токов утечки и порогового напряжения, изменения подвижности носителей заряда и ёмкости затвора. Дана характеристика эффективности использования high-k-материалов (HfO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>) и структурного улучшения транзисторов. Обосновано, что эти способы позволяют значительно повысить производительность и энергоэффективность МДП-структур для современной микроэлектроники и силовой энергетики. В работе описаны преимущества и недостатки таких новых подходов к созданию мемристорных устройств и энергонезависимой памяти, как внедрение наночастиц золота и оптическое управление.

**Ключевые слова:** МДП-структура, пороговое напряжение, подвижность носителей заряда, ток утечки, high-k-диэлектрики полупроводниковые устройства, микроэлектроника

**Gorodetskii<sup>1</sup> N. A., Zhalnin<sup>2</sup> V.P., Zhezlo<sup>3</sup> D.I., Shakhnov<sup>4</sup> V.V.**

<sup>1,2,3,4</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> zhalnin@mail.ru

## **REVIEW OF RESEARCH ON THE ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR STRUCTURES FOR PERFORMANCE IMPROVEMENT**

**Abstract.** This paper provides an overview of modern methods for improving the electronic and optical properties of MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) structures and the influence of these methods on such parameters of modern semiconductor devices as threshold voltage, charge carrier mobility, leakage currents, and gate capacitance. The main focus is on methods for reducing defect density, decreasing leakage currents and threshold voltage, and modifying charge carrier mobility and gate capacitance. The effectiveness of using high-k materials (HfO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>) and the structural improvement of transistors is characterized. It is substantiated that these methods can significantly enhance the performance and energy efficiency of MIS structures for modern microelectronics and power engineering. The paper describes the advantages and disadvantages of new approaches to creating memristive devices and non-volatile memory, such as the embedding of gold nanoparticles and optical control.

**Keywords:** MIS structure, threshold voltage, charge carrier mobility, leakage current, high-k dielectrics, semiconductor devices, microelectronics

### **Введение**

Постоянно растущий спрос на электронные устройства стимулирует развитие отрасли. Крупные компании конкурируют за поддержание технологического прогресса. Несмотря на это, в последние годы дальнейшее развитие электроники встречает определенные трудности, а необходимые затраты увеличиваются [1]. Чтобы удержать нынешние темпы развития, требуется исследовать новые способы и пути совершенствования используемых материалов, элементов и устройств.

Одной из наиболее важных сфер в электронике является полупроводниковая промышленность [2]. Это обусловлено тем, что полупроводники являются фундаментом для большинства современных устройств. Транзисторы, диоды и другие элементы активно используются в интегральных схемах, без которых трудно представить нынешние технологии. По этой причине особенно интересно рассмотреть структуру металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структура), которая считается одной из важнейших в полупроводниковом производстве.

МДП-структуры находят широкое применение в современной электронике. Они могут использоваться в качестве тестовых систем, солнечных элементов, фотодетекторов, а также как составные части MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor – Полевой транзистор с изолированным затвором), EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство) и др [3].

Целью данной статьи является обзор методов, которые позволили бы улучшить работу МДП-структур и послужить основой для дальнейшего развития устройств на их основе. Особое внимание будет уделено влиянию этих методов на изменение таких параметров, как пороговое напряжение, подвижность носителей заряда, подпороговый наклон, ток утечки и емкость затвора.

Основные принципы работы МДП-структур

1.1 Анализ МДП-структуры

МДП-структура представляет собой многослойную систему, являющуюся основой современных полевых транзисторов. В классическом варианте она состоит из металлического затвора, выполняющего функцию управляющего электрода, тонкого диэлектрического слоя, выступающего в роли изолятора, и полупроводниковой подложки, формирующей активную область устройства (рис. 1) [4].

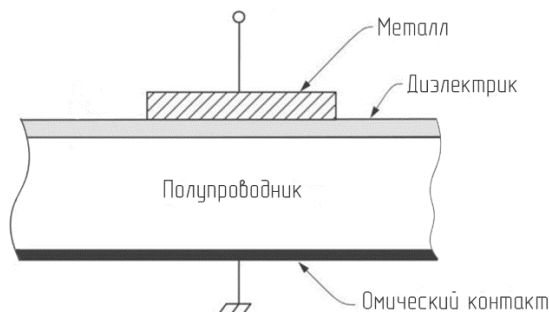


Рисунок 1 – Идеальный МДП-конденсатор

Это фундаментальная гетероструктура, используемая в микроэлектронике для создания активных элементов, таких как МДП-транзисторы (MOSFET). Эти структуры лежат в основе современных интегральных схем и микроэлектронных устройств благодаря их способности эффективно управлять электрическим током с помощью внешнего напряжения.

#### 1.2 Основные электронные характеристики и их влияние на производительность

Основные электронные характеристики МДП-структур, такие как пороговое напряжение, подвижность носителей заряда, подпороговый наклон, ток утечки и емкость затвора, играют критическую роль в определении производительности современных полупроводниковых устройств, включая транзисторы и интегральные схемы [5]. Пороговое напряжение – это минимальное напряжение на затворе, необходимое для образования проводящего канала между истоком и стоком. Его значение определяет энергоэффективность устройства: снижение порогового напряжения позволяет уменьшить рабочее напряжение, что напрямую сокращает динамическое энергопотребление. Однако слишком низкое пороговое напряжение может привести к росту тока утечки в выключенном состоянии, так как транзистор хуже управляет закрытием канала. Это создает компромисс между быстродействием и статическими потерями энергии, что требует тщательной оптимизации.

Подвижность носителей заряда в канале транзистора определяет скорость, с которой электроны или дырки перемещаются под действием электрического поля. Высокая подвижность напрямую увеличивает ток в открытом состоянии, что улучшает скорость переключения устройства и общую производительность. На подвижность влияют качество границы раздела между диэлектриком и полупроводником, уровень дефектов в материале, а также механизмы рассеяния носителей. Например, использование напряженного кремния или переход на материалы с высокой подвижностью, такие как арсенид галлия или графен, позволяет существенно повысить быстродействие транзисторов [6–8]. Однако такие решения часто сопряжены с технологическими сложностями и ростом стоимости производства.

Крутизна переходной (сток-затворной) характеристики в подпороговой области (подпороговый наклон) характеризует, насколько эффективно транзистор переключается между состояниями «включено» и «выключено». Этот параметр отражает скорость уменьшения тока при снижении напряжения ниже порогового. Меньший подпороговый наклон (более крутой переход) означает, что транзистор быстрее выключается, что снижает ток утечки в подпороговой области и улучшает энергоэффективность. Идеальный подпороговый наклон для классических MOSFET составляет около 60 мВ/дек (миллиВольты на декаду) при комнатной температуре, но достижение значений, близких к этому пределу, требует минимизации дефектов в диэлектрике и на границе раздела. Такие технологии, как полностью обедненные транзисторы (FD-SOI, Fully Depleted Silicon-on-Insulator – Полностью обедненный кремний на изоляторе) или устройства с вертикальной архитектурой, могут улучшить управление каналом и снизить подпороговый наклон [9, 10].

Ток утечки в МДП-структурах включает несколько компонентов: ток через закрытый канал (подпороговую утечку), туннельный ток через тонкий диэлектрик затвора и утечку через p-n-переходы. Этот параметр критичен для энергоэффективности, особенно в режиме ожидания. В современных процессорах с миллиардами транзисторов даже незначительный ток утечки на каждом элементе приводит к существенным общим потерям. Сокращение толщины диэлектрика для увеличения емкости затвора улучшает



управление каналом и усиливает туннелирование носителей через оксид, что вынуждает использовать high-k материалы (диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью), такие как гафний, вместо традиционного  $\text{SiO}_2$ . Это позволяет сохранить емкость, уменьшив физическую толщину слоя и подавив туннельные токи.

Емкость затвора влияет на скорость переключения транзистора и динамическое энергопотребление. Она складывается из емкости между затвором и каналом, а также паразитных емкостей, связанных с перекрытием затвора с истоком и стоком. Уменьшение емкости позволяет сократить время заряда/разряда узлов, что повышает быстродействие. Однако снижение толщины диэлектрика для увеличения емкости (и улучшения контроля над каналом) может усилить токи утечки.

Взаимосвязь этих характеристик формирует основу для проектирования полупроводниковых устройств. Например, повышение подвижности носителей и снижение емкости затвора улучшают быстродействие, но требуют компенсации потенциального роста токов утечки за счет уменьшения порогового напряжения и подпорогового наклона. Современные технологические узлы размером 5 нм, 3 нм сталкиваются с фундаментальными физическими ограничениями, такими как квантовое туннелирование и тепловыделение, что делает баланс между параметрами всё более сложным [11].

## 2. Способы Повышения эффективности МДП-структур

### 2.1 Методы улучшения структуры МОП-транзисторов

Одним из ведущих направлений в повышении эффективности работы МДП структур является вопрос улучшения качества границы раздела диэлектрик-полупроводник. Граница раздела диэлектрика и полупроводника, особенно в области канала транзистора, непосредственно влияет на подвижность носителей заряда, стабильность порогового напряжения и уровень шумов. Дефекты на ней, такие как незавершенные химические связи, примеси или структурные несовершенства, действуют как центры рассеяния, замедляющие движение электронов или дырок, а также создают ловушки заряда, которые могут необратимо изменять электрические характеристики устройства.

В качестве метода совершенствования алмазных МОП-транзисторов могут использоваться атомарно гладкие поверхности (например, алмаза (111)) для минимизации шероховатости и снижения плотности интерфейсных состояний ( $D_{it}$ ). Этого можно достичь с помощью гомоэпитаксиального латерального роста для создания мезоструктур без ступенек. Данный метод устраняет шероховатость границы раздела, снижая рассеяние на неровностях и  $D_{it}$ . Мезоструктуры формируются методом ICP-травления (Inductively Coupled Plasma Etching – травление в индуктивно-связанной плазме или методом сухого плазменного травления), после чего алмаз выращивается в латеральном режиме для заполнения ступенек структур (рис. 2) [12].

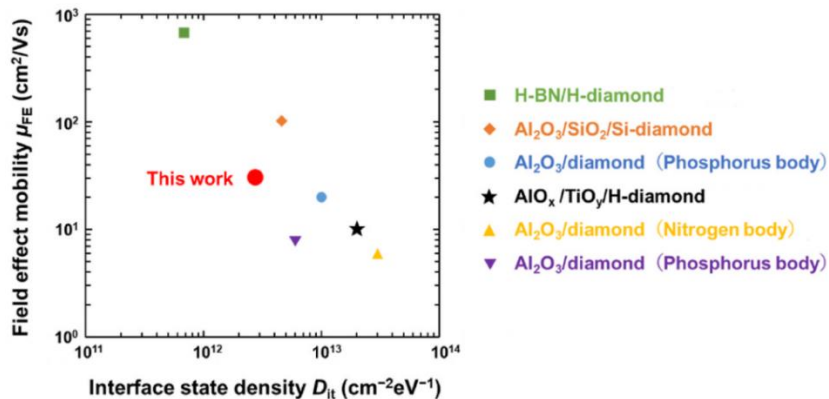


Рисунок 2 – Зависимость плотности состояний границы раздела ( $D_{it}$ ) от полевой подвижности ( $\mu_{FE}$ ) для различных алмазных МДП-структур

В результате можно получить очень низкое значение плотности состояний для алмазных МДП-структур. В результате исследования инверсионного p-канального MOSFET с атомарно гладкой границей раздела  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{алмаз}$  (111) было получено значение  $D_{it} = 2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{эВ}^{-1}$  [12].

Помимо этого, авторы исследования осуществляют терминацию поверхности, в частности, гидроксильную OH-терминацию: поверхность алмаза обрабатывается в смеси  $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ , после чего проводится влажный отжиг при  $500^\circ\text{C}$ . В итоге происходит стабилизация OH-групп на поверхности, что уменьшает зарядовые состояния на границе раздела и улучшает адгезию диэлектрика.

Другим методом в данном случае выступает осаждение  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : атомно-слоевое осаждение (ALD – Atomic Layer Deposition) при  $300^\circ\text{C}$  обеспечивает равномерное покрытие без дефектов. Это способствует снижению заряда в оксиде и улучшению электростатического управления каналом (рисунок 3) [12].

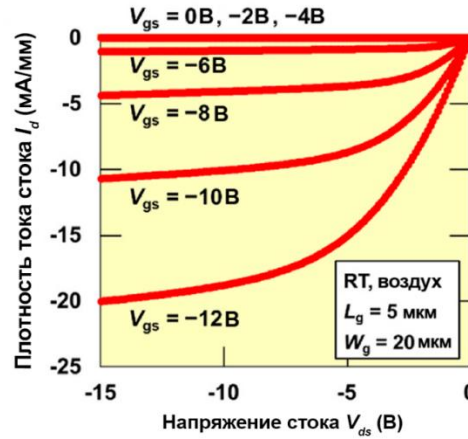


Рисунок 3 – Зависимость плотности тока стока ( $I_d$ ) от напряжения стока ( $V_{ds}$ ) при различных значениях напряжения затвора ( $V_{gs}$ ) и комнатной температуре

По результатам экспериментов можно увидеть, что подвижность носителей заряда ( $\mu_{FE}$ ) после применения данных методов увеличилась до  $30,6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Это в 1,5 раза выше предыдущих полученных значений ( $20 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  для фосфор-легированного тела и  $6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  для азот-легированного) [13 – 15]. Максимальная плотность тока стока ( $I_d$ ), наблюдавшаяся в диапазоне различных значений напряжений, составила  $-20,0 \text{ мА/мм}$  (рис. 3). Это самое высокое значение, полученное на сегодняшний день для инверсионных алмазных MOSFET с границей раздела  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{алмаз}$  [12]. Было зафиксировано значение порогового напряжения  $V_{th} = -5,1 \text{ В}$ , демонстрируя устойчивый режим обогащения. Равный  $263 \text{ мВ/дек}$  подпороговый наклон (SS) отражает улучшение качества границы и снижение влияния ловушечных состояний. В то же время плотность тока утечки затвора при напряжении  $-12 \text{ В}$  составила  $35,7 \text{ нА/мм}$  – это подтверждает стабильность изоляционного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Таким образом, устранение атомарных ступенек на границе раздела позволяет минимизировать рассеяние носителей и приблизить характеристики устройства к теоретическим пределам.

Примером улучшения характеристик является GaN MOSFET в режиме обогащения с наращенным слоем AlGaIn в областях истока/стока (S/D). В исследовании проводилось сравнение двух различных МОП-транзисторов: MOSFET A и MOSFET B. Пороговое напряжение устройства с наращением AlGaIn (MOSFET A) составляет  $1,6 \text{ В}$ , что ниже, чем у аналога с наращением  $\text{n}^+\text{-GaIn}$  ( $1,9 \text{ В}$ ) (MOSFET B), благодаря повышенной плотности двумерного электронного газа (2DEG) в области S/D [13]. При длине затвора  $L_g = 10 \text{ мкм}$  MOSFET A демонстрирует  $I_{D,max} = 57 \text{ мА/мм}$ . Это в 2 раза выше, чем у MOSFET B ( $26 \text{ мА/мм}$ ) (рис. 4) [13].

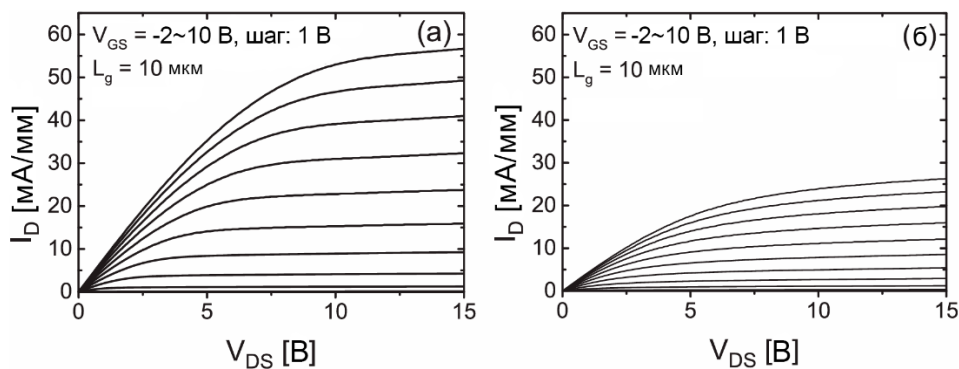


Рисунок 4 – Выходные характеристики постоянного тока для (а) MOSFET A и (б) MOSFET B

В MOSFET A слой AlGaIn наращивается непосредственно на GaN в областях S/D без предварительного травления, что исключает повреждение поверхности плазмой (в отличие от MOSFET B, где используется травление) (рис. 4). Это сохраняет структурную целостность гетероперехода AlGaIn/GaN, формируя 2DEG в S/D, в свою очередь снижая последовательное сопротивление. Если сравнивать  $\mu_{FE}$ , то для MOSFET A она достигает  $59 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , в то время как для MOSFET B –  $23 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Эта разница обусловлена снижением сопротивления в канале и улучшенным управлением электронами за счет гетероперехода AlGaIn/GaN [13]. При использовании в MOSFET A более

толстого слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в частности 35 нм в сравнении с 30 нм в MOSFET В в проведенном исследовании, уменьшается вертикальное рассеяние носителей и улучшается подвижность в канале.

Кроме того, переход от узкого наращивания (только S/D) к широкому наращиванию (на всю область, кроме затвора) также повышает качество слоя AlGaIn. Широкое наращивание обеспечивает лучшее слияние кристаллов, уменьшая поверхностные дефекты (шероховатость). В результате напряжение пробоя увеличивается с 25 В до 192 В (рис. 5) [13].

Это также позволяет оптимизировать толщину AlGaIn (140 нм для широкого наращивания, 180 нм для узкого) и состав алюминия (34%), что критично для формирования стабильного 2DEG.

В устройствах с широким наращиванием расстояние  $L_{\text{GD}}$  было увеличено авторами исследования до 7 мкм. Это снизило среднее электрическое поле в области S/D (до 0.27 МВ/см) и предотвратило преждевременный пробой [13].

Эти изменения приводят к значительному улучшению параметров: максимальный ток стока ( $I_{\text{D,max}}$ ) демонстрирует рост до 321 мА/мм (в то время как при узком наращивании 261 мА/мм), а  $\mu_{\text{FE}}$  достигает 113  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Стабильность порогового напряжения ( $\Delta V_{\text{th}} = 0.5$  В) подтверждает однородность структуры и отсутствие плазменных повреждений [13]. Таким образом, предложенный метод обеспечивает улучшение характеристик и делает GaN MOSFET более перспективным для энергоэффективных приложений.

Нитризация (Азотирование) подзатворного диэлектрика и последующая термообработка позволяют снизить плотность поверхностных состояний и улучшить стабильность МДП-структур (рис. 6) [14]. Это особенно важно для устройств, работающих в условиях ионизирующего излучения.

Азотирование представляет собой процесс внедрения атомов азота в подзатворный оксид ( $\text{SiO}_2$ ) с помощью ионной имплантации. В проведенном исследовании демонстрируется, как ионы азота, ускоряясь до энергий 20 и 40 кэВ в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$ , имплантируются в кремниевую пластину через защитный оксид толщиной 23 нм. Последующая быстрая термообработка (БТО) при 1000°C в течение 15 секунд активирует имплантированные атомы азота и стабилизирует структуру.

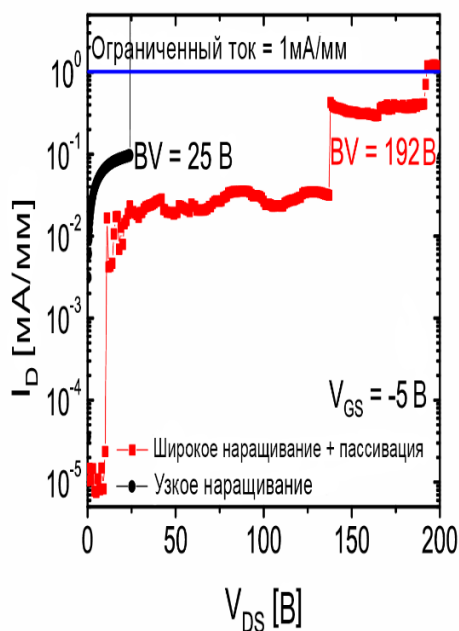


Рисунок 5 – Характеристики пробоя (узкое и широкое наращивание AlGaIn)

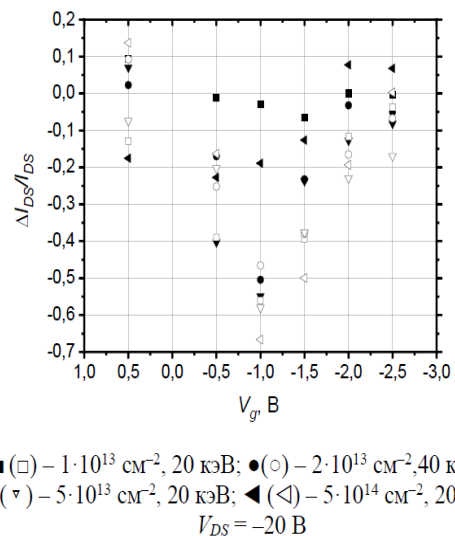


Рисунок 6 – Зависимости относительного изменения тока сток-исток ( $\Delta I_{\text{DS}}/I_{\text{DS}}$ ) от напряжения на затворе МОП-транзисторов с диэлектриком азотированным методом ионной имплантации, по сравнению с соответствующими контрольными образцами. Режим имплантации азота (черные значки – обратный порядок БТО, белые значки – прямой порядок БТО) [14]

В результате улучшения данным методом можно добиться улучшения некоторых рассматриваемых нами показателей. Исходя из экспериментов, демонстрируется снижение тока S/D ( $I_{\text{DS}}$ ) в подпороговой области ( $V_{\text{G}} = 0,5 \dots -1,5$  В), что свидетель-

ствуется об улучшении подпорогового наклона. Это связано с увеличением концентрации легирующей примеси (фосфора) в канале из-за изменения коэффициента сегрегации на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , обогащенной азотом (рис. 6). В то же время это может приводить к повышению порогового напряжения, так как более высокая концентрация примеси требует большего напряжения для формирования инверсионного слоя. Ток утечки затвора уменьшается, что обусловлено снижением плотности поверхностных состояний на границе раздела  $\text{Si-SiO}_2$  [18]. Наиболее выраженные улучшения достигаются при прямом порядке термообработки, где азотирование эффективнее блокирует сегрегацию примесей, обеспечивая оптимальные электрофизические характеристики.

## 2.2 Использование high-k материалов

Замена традиционных диэлектриков на high-k материалы (например,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) позволит улучшить электронные характеристики – снизить токи утечки и увеличить емкость затвора, что улучшит производительность транзисторов [19 – 21].

Результаты демонстрируют, что high-k диэлектрики обеспечивают существенное снижение плотности поверхностных состояний – более чем на порядок по сравнению с  $\text{SiO}_2$ . Это приводит к улучшению подвижности носителей заряда в канале и снижению удельного сопротивления в открытом состоянии. Использование такого диэлектрика в MOSFET демонстрирует снижение порогового напряжения до 35% по сравнению с устройствами на основе  $\text{SiO}_2$  (рис. 7). Кроме того, high-k материалы показывают повышенную стабильность порогового напряжения при длительных нагрузках: после 100 часов HTGB-тестов (High-Temperature Gate-Bias – высокотемпературное смещение затвора) дрейф порогового напряжения составляет менее 100 мВ, в то время как у  $\text{SiO}_2$ -устройств он достигает 500 мВ [19]. Это связано с уменьшением захвата зарядов на границе раздела и подавлением гистерезиса в затворной структуре.

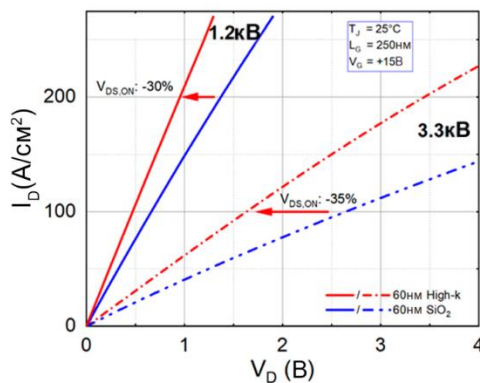


Рисунок 7 – Статическое сравнение включенных транзисторов SiC MOSFET с диэлектриком high-k и  $\text{SiO}_2$  (1,2 кВ и 3,3 кВ) [19]

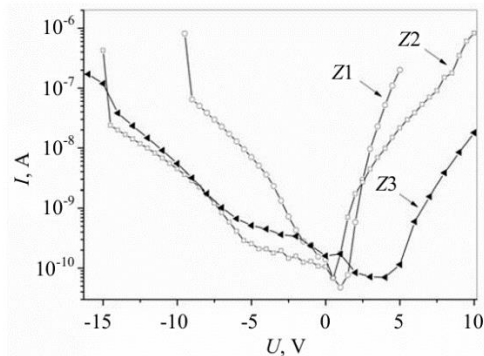


Рисунок 8 – Вольт-амперные характеристики МОП-конденсатора с подзатворным диэлектриком  $\text{ZrO}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$  (4 %): Z1 – без отжига; Z2 – отжиг при 400 °C; Z3 – отжиг при 600 °C [20]

Использование тонких слоев high-k диэлектрика в комбинации с отжигом после осаждения при температуре 600 °C способствует снижению токов утечки (рис. 8). Отжиг способствует формированию поликристаллической фазы в диэлектрике, что повышает его структурную однородность и уменьшает дефектность, критически влияющую на токи утечки. Кроме того, диэлектрическая проницаемость материала (k) после отжига достигает значения 20.9. Данный результат в пять раз превышает аналогичный показатель для  $\text{SiO}_2$  ( $k = 3.9$ ). Такое увеличение k позволяет использовать более толстые слои диэлектрика без потери емкостных характеристик, что дополнительно снижает риск пробоя и улучшает стабильность устройства.

Электронные характеристики МДП-структуры 4H-SiC траншейного MOSFET были улучшены за счет интеграции high-k диэлектрика как в затворную область, так и в глубокую траншею дрейфовой области [21]. Сочетание high-k-затворного диэлектрика и расширенного high-k-траншейного диэлектрика в дрейфовой области модулирует распределение электрического поля, создавая дополнительный пик напряженности (до 2.1 МВ/см) на границе с 4H-SiC. Благодаря этому INHK-TMOS (Integrated High-K Trench MOSFET – Траншейный полевой транзистор с изолированным затвором с интегрированным диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью) демонстрирует снижение порогового напряжения на 52,6% (рис. 9), уменьшение удельного сопротивления ( $R_{\text{on,sp}}$ ) на 52,1% и увеличение общего напряжения пробоя (BV) на 20,3% по сравнению с традиционным TMOS (Trench MOSFET – Траншейный полевой транзистор с изолированным затвором) (рис. 10). Кроме того,

эффект вспомогательного обеднения (SAD), вызванный притяжением линий электрического поля к high-k материалу, позволяет повысить концентрацию легирования дрейфовой области ( $N_D$ ) с  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  до  $11 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  без уменьшения напряжения пробоя. Такая модификация обеспечивает более равномерное распределение эквипотенциальных линий и снижает локальные перегрузки, тем самым повышая надежность.

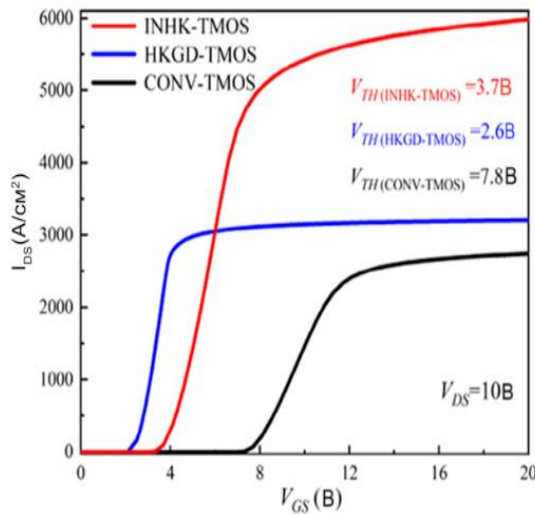


Рисунок 9 – Переходные характеристики в структурах INHK-TMOS, HKGD-TMOS и CONV-TMOS [21]

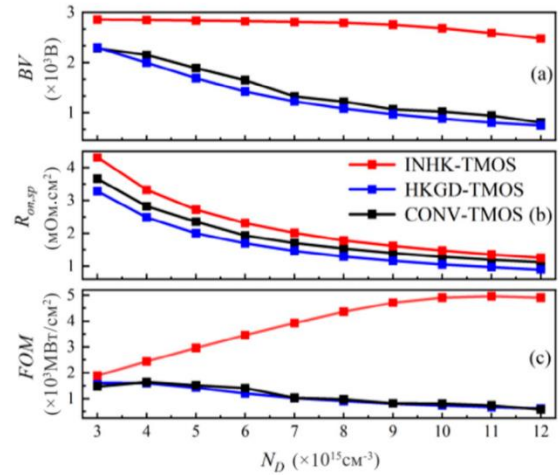


Рисунок 10 – Зависимости общего напряжения пробоя (BV), удельного сопротивления ( $R_{on,sp}$ ) и показателя качества (FOM) в зависимости от концентрации легирования ( $N_D$ ) [21]

Результаты моделирования продемонстрировали, что интеграция high-k диэлектрика также улучшила частотные характеристики: время включения ( $t_{on}$ ) составило 12 нс, а время выключения ( $t_{off}$ ) – 33 нс. Данный результат сопоставим с традиционными аналогами, несмотря на увеличенную ёмкость затвора [21]. Однако ключевым достижением стал рост показателя качества ( $FOM = BV^2 / R_{on}$ ) на 202.3% – до  $4955 \text{ МВт/см}^2$ , что превосходит пределы, предсказанные для SiC-устройств.

Данные свойства критически важны для силовых решений, таких как преобразователи для электромобилей и системы возобновляемой энергетики.

#### 2.4 Повышение эффективности работы сенсорных устройств

Исследование [22] показало, что использование пленок Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) на основе  $\beta$ -циклодекстрина и фенантрена в МДП-структурах оказывает значительное влияние на их электрофизические характеристики (рис. 11). Нанесение пленки ЛБ приводит к снижению высоты потенциального барьера (с 0,72 до 0,64 эВ) – это способствует уменьшению порогового напряжения за счет облегчения инжекции носителей заряда.

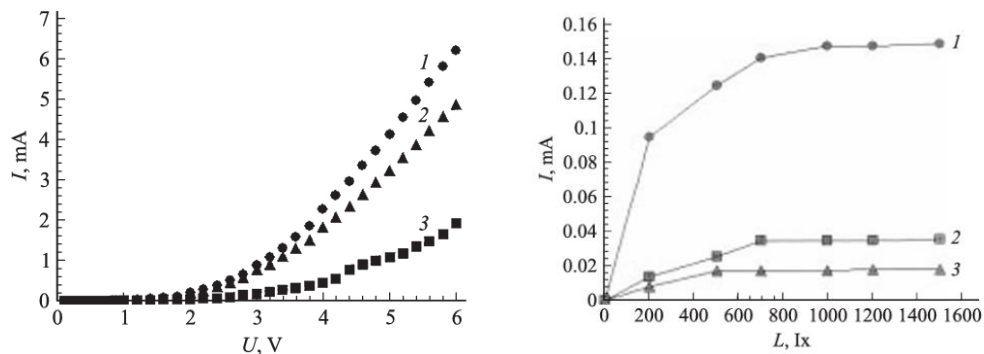


Рисунок 11 – Вольт-амперные и Люкс-амперные характеристики МДП-структур: 1 – без пленки, 2 – 19 монослоев, 3 – 57 монослоев [22]

Уменьшение тока короткого замыкания с ростом числа слоев при освещении свидетельствует об улучшении изоляционных свойств. Емкость затвора, в свою очередь, снижается из-за увеличения толщины диэлектрического слоя, что согласуется с уменьшением показателя преломления и плотности пленки. Таким образом, модификация структуры пленками ЛБ позволяет улучшить параметры МДП-устройств.

Исследование фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе гетероэпитаксиального  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,21-0,23$ ) с приповерхностными варизонными слоями показало улучшение стабильности работы [23]. Введение варизонных слоев



с повышенным содержанием CdTe способствует снижению влияния поверхностной рекомбинации и увеличению эффективного времени жизни неосновных носителей заряда. Это, в свою очередь, повышает дифференциальное сопротивление области пространственного заряда (ОПЗ), ограничивая его диффузией носителей вместо туннелирования через глубокие уровни [23]. Для структур с варизонными слоями наблюдается стабильность фотоЭДС в режиме сильной инверсии, что косвенно указывает на улучшение управления пороговым напряжением за счет снижения паразитных генерационных процессов (рис. 12).

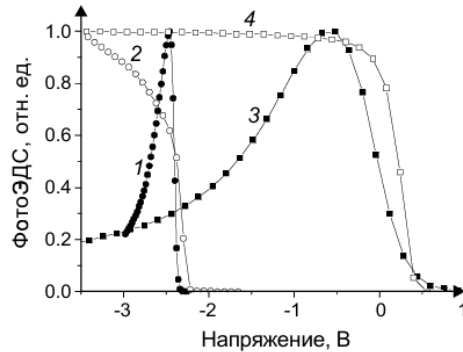


Рисунок 12 – Зависимость фото ЭДС от напряжения смещения для МДП-структур [23]

Уменьшение туннельной генерации в структурах с варизонными слоями способствует снижению тока утечки, особенно при низких температурах. Подпороговый наклон улучшается благодаря увеличению сопротивления ОПЗ, снижая нежелательные токи в подпороговом режиме. Таким образом, использование варизонных слоев улучшает работу МДП-структур, повышая их надежность и чувствительность в инфракрасном диапазоне.

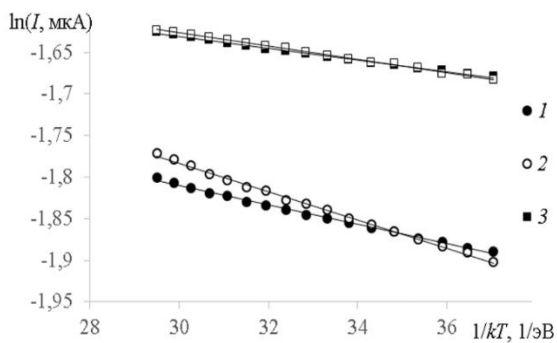


Рисунок 13 – Температурные зависимости силы тока насыщения, измеренные в воздухе и вакууме при значении потенциала смещения затвора 30 В и разности потенциалов между стоком и истоком 30 В. Измерения выполнены: 1, 2 – в воздушной среде; 3, 4 – в вакууме; 1, 3 – при нагревании; 2, 4 – при охлаждении [24]

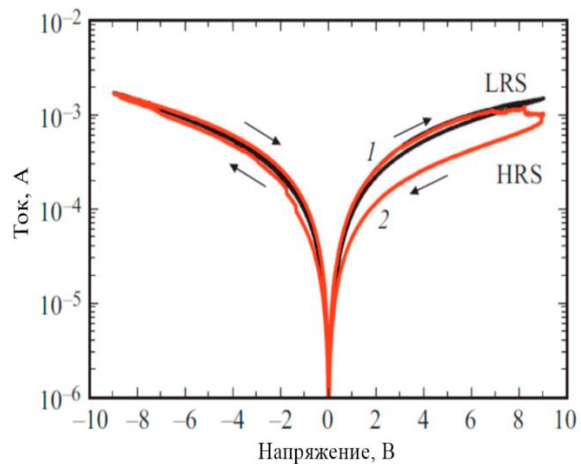


Рисунок 14 – Циклические ВАХ МДП-структуры ITO/ZrO<sub>2</sub>(Y)/n-Si: темновые (1) и при воздействии излучения с  $\lambda = 650$  нм (2) [25]

В результате исследования органо-неорганической МДП-структуры на основе фталоцианина меди (CuPc) и оксида индия (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) были достигнуты улучшения ключевых характеристик тонкопленочного полевого транзистора [24]. Применение CuPc в качестве подзатворного диэлектрика позволило эффективно управлять пороговым напряжением, что подтверждается значительным ростом выходного тока при подаче положительного потенциала на затвор [24]. Подвижность носителей заряда в полупроводниковом слое In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> увеличивается при снижении концентрации адсорбированного кислорода. Это демонстрируют температурные зависимости тока насыщения в вакууме по сравнению с воздушной средой (рис. 13). Низкая удельная проводимость CuPc по сравнению с In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> способствует снижению тока утечки через диэлектрический слой, повышая энергоэффективность устройства. Улучшение диэлектрических свойств фталоцианина меди также способствует стабилизации ёмкости затвора, что подтверждается воспроизводимостью характеристик при температурах до 200 °С. Благодаря комплексному совершенствованию параметров, данная структура представляет собой

перспективную основу для разработки высокоточных сенсорных систем химического обнаружения.

Оптическое излучение видимого диапазона и внедрение наночастиц Au в МДП-структуры  $\text{ITO}/\text{ZrO}_2(\text{Y})/\text{n-Si}$  оказывают значительное влияние на характеристики резистивного переключения. Согласно исследованию [25], пороговое напряжение уменьшается при фотовозбуждении с длиной волны 472 нм благодаря пассивации поверхностных состояний на границе  $\text{Si}/\text{ZrO}_2(\text{Y})$  наночастицами Au (рис. 14). Это снижает рекомбинацию носителей заряда, что также способствует улучшению подвижности носителей за счет уменьшения рассеяния на дефектах.

При длине волны 650 нм (соответствующей плазмонному резонансу в Au) наблюдается подавление резистивного переключения из-за экранирующего эффекта плазмонного поглощения в наночастицах. Это снижает генерацию электронно-дырочных пар в Si-подложке, уменьшая фотоэдс ( $\Delta\Phi$ ), ток утечки и, как следствие, напряженность электрического поля в диэлектрике [25]. Кроме того, оптическое управление напряженностью поля в диэлектрике позволяет точнее контролировать формирование проводящих филаментов. Это косвенно влияет на емкость затвора, стабилизируя ее за счет уменьшения паразитных зарядов.

При превышении порога интенсивности излучения наблюдается нагрев структуры, уменьшая диффузионную длину носителей и снижая вклад фотовозбуждения в перераспределение напряжения. Это ограничивает дальнейшее улучшение параметров, но позволяет точно контролировать состояние структуры. Комбинация оптического воздействия и наночастиц Au позволяет улучшить параметры мемристорных структур для применения в энергонезависимой памяти и нейроморфных системах [26, 27].

#### Заключение

В работе был проведен комплексный анализ электронных и оптических свойств структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), а также рассмотрены методы их совершенствования. Основное внимание было уделено взаимосвязи параметров, таких как пороговое напряжение, подвижность носителей заряда, токи утечки и ёмкость затвора, которые определяют производительность современных полупроводниковых устройств.

Улучшение качества границы раздела диэлектрик-полупроводник за счет атомарно гладких поверхностей и термической обработки позволяет снизить плотность дефектов, что напрямую влияет на подвижность носителей и стабильность устройств. Использование high-k материалов, таких как  $\text{HfO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ , не только уменьшает токи утечки, но и повышает ёмкость затвора, обеспечивая более эффективное управление каналом. Структурные модификации, такие как наращивание гетеропереходов  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  и увеличение расстояния между электродами, способствует повышению напряжения пробоя и снижению локальных перегрузок, что критически важно для силовых приложений.

Особый интерес представляют инновационные подходы, такие как внедрение наночастиц золота и оптическое управление, которые открывают новые возможности для создания мемристорных устройств и энергонезависимой памяти. Однако реализация многих методов сопряжена с технологическими сложностями, включая высокую стоимость материалов и необходимость точного контроля процессов изготовления.

Дальнейшее развитие МДП-структур будет зависеть от поиска новых материалов, оптимизации существующих технологий и преодоления фундаментальных ограничений, связанных с квантовыми эффектами и тепловыделением. Полученные результаты создают основу для проектирования энергоэффективных и высокопроизводительных устройств, востребованных в области микроэлектроники, силовой электроники и сенсорных технологий.

Благодарности: Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSN-0705-2024-0019.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седых Н.В. Мировой рынок полупроводников: основные тенденции и проблемы // Вестник Академии знаний № 2 (55). 2023. С. 222 – 224.
2. Скопьюк, В. А. Состояние современной мировой полупроводниковой индустрии / В. А. Скопьюк, И. В. Клименко // Устойчивое развитие экономики: международные и национальные аспекты: электронный сборник статей V Международной научно-практической конференции, Новополоцк, 13-14 окт. 2022 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. – Новополоцк, 2022. – С. 422-426.
3. Жигальский А.А. Проектирование и конструирование микросхем: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 195 с.
4. Sze, S. M. Physics of Semiconductor Devices / S. M. Sze, Y. Li, K. K. Ng. – 4th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2021. – 944 с. – ISBN (978-1-119-42911-1).
5. Андреев В. В., Жалнин В. П., Столяров А. А. Физические основы микро- и нанoeлектроники: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э.Баумана, 2023. – 292, [1] с.: ил. (Библиотека «Приборостроение». Т.3).
6. Minamisawa, R., Süess, M., Spolenak, R. et al. Top-down fabricated silicon nanowires under tensile elastic strain up to 4.5%. // Nat Commun 3. 1096. 2012.

7. Громов Д.В., Краснюк А.А. Материаловедение для микро- и нано-электроники: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 156 с.
8. Comprehensive Study and Design of Graphene Transistor. / Cai, Q.; Ye, J.; Jahannia, B.; Wang, H.; Patil, C.; Al Foysal Redoy, R.; Sidam, A.; Sameer, S.; Aljohani, S.; Umer, M.; et al. // Micromachines. 2024. 406.
9. Zhixian Jiao. Implementation of a Fully Depleted A-Channel SOI NMOSFET. University of Toronto. 2000.
10. Yang, Q., Luo, ZD., Duan, H. et al. Steep-slope vertical-transport transistors built from sub-5nm Thin van der Waals heterostructures. // Nature Communications. 15. 1138 2024.
11. Власов А. И., Жалнин В. П., Селиванов К. В. Физико-химические основы приборостроения: учеб. пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э.Баумана, 2024. – 531, [1] с.: ил. (Библиотека «Приборостроение». Т.11).
12. Kazuki Kobayashi, Kai Sato, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Toshiharu Makino, Tsubasa Matsumoto, Kimiyoshi Ichikawa, Kan Hayashi, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, Christoph E. Nebel, Norio Tokuda. Fabrication of inversion channel diamond MOSFET with atomically step-free Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/diamond interface // Carbon. 235. 2025. 120024.
13. Tsubasa Matsumoto, Tomoya Yamakawa, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Xufang Zhang, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, Norio Tokuda. Fabrication of inversion p-channel MOSFET with a nitrogen-doped diamond body. // Appl. Phys. Lett. 119. 2021. 242105.
14. Masatsugu Nagai, Ryo Yoshida, Tatsuki Yamada, Taira Tabakoya, Christoph E. Nebel, Satoshi Yamasaki, Toshiharu Makino, Tsubasa Matsumoto, Takao Inokuma, Norio Tokuda. Conductive-probe atomic force microscopy and Kelvin-probe force microscopy characterization of OH-terminated diamond (111) surfaces with step-terrace structures // Japanese Journal of Applied Physics 58, SIIB08. 2019.
15. Tsubasa Matsumoto, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Daisuke Takeuchi, Satoshi Yamasaki, Takao Inokuma, Norio Tokuda. Inversion channel mobility and interface state density of diamond MOSFET using N-type body with various phosphorus concentrations. // Appl. Phys. Lett. 114. 2019. 242101.
16. Seung Heon Shin, Do-Kywn Kim, Sung-bum Bae, Hyung-Seok Lee, Jung-Hee Lee, Dong-Seok Kim. Improvement of electrical performance in Normally-Off GaN MOSFET with regrown AlGaIn layer on the Source/Drain region. // Solid-State Electronics. 220. 2024. 108987.
17. Стоковые характеристики силовых МОП-транзисторов с диэлектриком, азотированным ионной имплантацией. / Оджаев В. В., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Ковальчук Н. С., Черный В. В., Шестовский Д. В., Янковский Ю. Н. // Доклады конф. БНТУ. 2024. С. 241-242.
18. Влияние ионной имплантации азота на электро-физические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов. / Оджаев ВВ, Панфиленко АК, Петлицкий АН, Просолович ВС, Ковальчук НС, Соловьев ЯА, Филипеня ВА, Шестовский ДВ. // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2020. № 3. С. 55-64.
19. Latest Advances in the Implementation and Characterization of High-K Gate Dielectrics in SiC Power MOSFETs. / Lars Knoll, Giovanni Alfieri, Gianpaolo Romano, Andrei Mihaila, Yulieth Arango, Moritz Wehrle, Vinoth Sundaramoorthy, Stephan Wirths. // Silicon Carbide and Related Materials. 2021. pp.383-388.
20. Характеристики МОП-конденсаторов, сформированных осаждением слоев диэлектрика ZrO<sub>2</sub>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на гетероструктурах Ge/Si(001), выращенных методом HW CVD. / А. М. Титова, Н. А. Алябина, С. А. Денисов, В. Ю. Чалков, В. Г. Шенгуров, А. В. Нежданов, А. В. Здравейцев, Е. А. Архипова, Ю. Н. Бузынин. // Прикладная физика, № 1. 2024. С. 85-90.
21. Investigations of 4H-SiC trench MOSFET with integrated high-K deep trench and gate dielectric. / Jiafei Yao Jing Chen Yuao Liu Ang Li Xue Han Qing Yao Kemeng Yang Man Li Mao lin Zhang Jun Zhang Yu feng Guo. // IET Power Electronics. 2024. pp. 869-877.
22. Электрофизические свойства МДП-структур, содержащих наноразмерные пленки Ленгмюра Блоджетт на основе β-циклодекстрина. А.М. Яценко, Д.А. Гоин, К.Е. Панкин, А.А. Невешкин, М.А. Гецман, В.Н. Климов, С.Н. Штыков // Журнал технической физики, том 76, вып. 4. 2006. С. 105-108.
23. Фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе гетероэпитаксиального n-Hg<sub>1-x</sub>CdxTe (x = 0,21-0,23) / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядох и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 8. С. 56-62.
24. Мисевич, А. В. Электрические свойства сенсорной МДП-структуры на основе фталоцианина меди и оксида индия / А. В. Мисевич, А. Н. Лаппо, В. К. Долгий // Информационные технологии: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 195-198.
25. Влияние оптического излучения на резистивное переключение в МДП-структурах на основе пленок ZrO<sub>2</sub>(Y) с наночастицами Au / Д. О. Филатов, М. Е. Шенина, И. А. Роженцов [и др.] // Физика и техника полупроводников / Российская академия наук, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе. Санкт-Петербург, 2021. Т. 55, вып. 9. С. 754-757.
26. Ду Х., Жалнин В.П., Шахнов В.А. Схемотехническое моделирование мемристоров // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2024. Т. 26. № 2. С. 34-48.
27. Жалнин В.П., Павлов Д.С., Ткач В.Д., Богатков А.Д. Перспективы применения мемристоров // Технологии инженерных и информационных систем. 2024. № 2. С. 37-52.



УДК 621.396.96

**Власов<sup>1</sup> А.И., Гайворонский<sup>2</sup> А.И., Жалнин<sup>3</sup> В.П., Калинин<sup>4</sup> К.Д.**

<sup>1,2,3,4</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup> vlasovai@bmstu.ru

<sup>2</sup> alex.gaivoronskiil@gmail.com

<sup>3</sup> zhalnin@mail.ru

<sup>4</sup> kirill1123@gmail.com

## **ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ: ОТ ГРАФЕНА ДО ПЕРОВСКИТОВ**

**Аннотация.** Проводится обзор и анализ современных материалов и структур для инфракрасных датчиков нового поколения. Проведено исследование широкого спектра научных работ и публикаций, посвященных переходу от традиционных полупроводников к низкоразмерным системам. Основной задачей исследования является систематизация и сравнение актуальных решений в области ИК-фотоники, охватывающих диапазон от графена до галогенидных перовскитов. В работе рассмотрены ключевые методы синтеза наноструктур, способы их характеризации, а также значимые достижения в области повышения обнаружительной способности устройств при комнатной температуре. Представлены различные архитектуры фотодетекторов, созданные на основе гибридных гетероструктур, которые находят применение в современных системах технического зрения и интернета вещей. Подробно описаны физические принципы функционирования сенсоров, включая механизмы фотогейтинга и фототермоэлектрического эффекта, выявлены их ключевые преимущества и технологические ограничения. Приведены примеры практического внедрения данных материалов в областях, где компактность и энергоэффективность ИК-систем имеют решающее значение.

**Ключевые слова:** инфракрасные датчики, графен, галогенидные перовскиты, низкоразмерные материалы, гибридные гетероструктуры, фотогейтинг, неохлаждаемая фотоника, спектральная чувствительность, удельная обнаружительная способность, КМОП-интеграция

**Vlasov<sup>1</sup> A.I., Gaivoronskiy<sup>2</sup> A.I., Zhalnin<sup>3</sup> V.P., Kalnin<sup>4</sup> K.D.**

<sup>1,2,3,4</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1</sup> vlasovai@bmstu.ru

<sup>2</sup> alex.gaivoronskiil@gmail.com

<sup>3</sup> zhalnin@mail.ru

<sup>4</sup> kirill1123@gmail.com

## **AN OVERVIEW OF MODERN MATERIALS AND STRUCTURES FOR INFRARED SENSORS: FROM GRAPHENE TO PEROVSKITES**

**Abstract.** This article provides an overview and analysis of modern materials and structures for a new generation of infrared sensors. A wide range of scientific papers and publications devoted to the transition from traditional semiconductors to low-dimensional systems has been studied. The main objective of the article is to systematize and compare current solutions in the field of IR photonics, covering the range from graphene to halide perovskites. The paper discusses key methods for synthesizing nanostructures, ways to characterize them, as well as significant achievements in improving the detection ability of devices at room temperature. Various photodetector architectures based on hybrid heterostructures that are used in modern vision systems and the Internet of Things are presented. The physical principles of the sensors' functioning, including the mechanisms of photogating and the photothermoelectric effect, are described in detail, their key advantages and technological limitations are revealed. Examples of practical implementation of these materials in areas where the compactness and energy efficiency of IR systems are crucial are given.

**Keywords:** infrared sensors, graphene, halide perovskites, low-dimensional materials, hybrid heterostructures, photogating, uncooled photonics, spectral sensitivity, specific detection ability, CMOS integration

### **Введение**

Инфракрасные (ИК) датчики занимают ключевую роль в современных технологиях охраны, мониторинга, медицинской диагностики и промышленной автоматизации. Их способность преобразовывать тепловые и световые сигналы в электрические ответы в широком спектральном диапазоне — от ближнего инфракрасного до дальнего инфракрасного — обеспечивает критическую функциональность во многих приложениях: от неинвазивной медицинской визуализации до систем ночного видения и термографического мониторинга промышленных процессов. В условиях растущего спроса на компактные, энергоэффективные и одновременно высокочувствительные детекторы важность выбора материалов и архитектур датчиков остается предметом активных исследований.

За последние годы наблюдается переход от традиционных к новым классам материалов, включая графен и другие двумерные (2D) материалы, графеноподобные системы, оксиды и композитные структуры, а также перовскиты и их гибриды. Эти материалы открывают новые механизмы поглощения, расширяют диапазон чувствительности и позволяют формировать гибкие, прозрачные и интегрируемые с CMOS устройства. Параллельно развиваются наноструктурированные архитектуры, резонаторные элементы и методы нанопотоники, направленные на управление локальными полями, усиление сигнала и подавление шума.

В работе проведено систематическое сопоставление современных материалов и архитектур для ИК-датчиков: от фундаментальных физических эффектов до практических аспектов синтеза, воспроизводимости и внедрения. В статье освещаются характеристики графена и 2D-материалов, перовскитов, их гибридов, а также гибридные и композитные системы, которые демонстрируют синергетический эффект комбинации разных носителей. Особое внимание уделяется взаимному влиянию материалов и структур на ключевые параметры датчиков: спектральная чувствительность, скорость отклика, коэффициент усиления, шумы и долговечность.

Инфракрасные датчики (ИК) занимают центральное место в современной оптоэлектронике, обеспечивая обнаружение теплового излучения, скрытых объектов, газов, дефектов. Они незаменимы в автономных транспортных средствах (ночные системы видения, обнаружение пешеходов), системах безопасности и умных домах, медицинской термографии, экологическом мониторинге (утечки метана, CO<sub>2</sub>), промышленном контроле, космических миссиях и перспективных технологиях связи в терагерцовом диапазоне.

Классические материалы для ИК-детекторов – HgCdTe, InSb, InGaAs – обеспечивают высокую производительность в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах [1]. Однако их применение ограничивается необходимостью криогенного охлаждения для подавления теплового шума, высокой стоимостью эпитаксиального роста и обработки, токсичностью компонентов, сложностью создания крупных массивов и низкой пригодностью для гибких, портативных или массовых устройств.

В последние годы внимание исследователей смещается к материалам нового поколения, способным работать при комнатной температуре, демонстрировать высокую чувствительность, широкополосный отклик и низкую себестоимость производства.

Развитие инфракрасной фотоники на основе низкоразмерных материалов и гибридных структур (графен, галогенидные перовскиты, дихалькогениды переходных металлов) открывает значительные перспективы для создания систем технического зрения нового поколения. Эти материалы обладают уникальным потенциалом для применения в гражданском и промышленном секторах, включая автономный транспорт, портативную медицину, системы экологического мониторинга и интернет вещей.

Использование графена и перовскитов обеспечивает возможность эффективного детектирования излучения при комнатной температуре без громоздких систем криогенного охлаждения. Высокая подвижность носителей заряда в графене в сочетании с перестраиваемой запрещенной зоной перовскитов позволяет достигать рекордных показателей чувствительности в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Гибридизация данных материалов позволяет реализовать механизм фотогейтинга, обеспечивающий колоссальное внутреннее усиление сигнала, что недоступно для традиционных кремниевых или германиевых аналогов.

#### 1. Методы и модели инфракрасного детектирования

Инфракрасное детектирование представляет собой процесс обнаружения и регистрации электромагнитного излучения в инфракрасной области спектра. Это излучение, невидимое для человеческого глаза, лежит между видимым светом и микроволновым диапазоном. Оно возникает от теплового движения атомов и молекул в объектах, имеющих температуру выше абсолютного нуля. Основная идея детектирования заключается в преобразовании энергии инфракрасного излучения в электрический сигнал, который можно измерить и проанализировать. Инфракрасное излучение – это часть электромагнитного спектра, где длина волны больше, чем у видимого света (красный край – около 0,7 микрометра), но меньше, чем у радиоволн (до 1 миллиметра). Оно делится на несколько поддиапазонов в зависимости от длины волны, энергии фотонов и типичных применений. Классификация помогает понять, какие материалы и механизмы подходят для каждого случая. Обычно выделяют следующие диапазоны [1, 2]:

Ближний инфракрасный диапазон (от 0,7 до 1,4 микрометра). Это область, близкая к видимому свету. Здесь излучение легко проходит через атмосферу, и оно часто используется в системах ночного видения, спектроскопии для анализа веществ (например, в пищевой промышленности для определения влаги или сахара) и в оптоволоконной связи. Энергия фотонов высока, поэтому детекторы могут работать при комнатной температуре без сильного охлаждения. Пример: камеры в смартфонах для распознавания лиц используют этот диапазон.

Коротковолновый инфракрасный диапазон (от 1,4 до 3 микрометров). Здесь излучение поглощается атмосферой слабее, чем в более длинных волнах, но всё же требует учета водяного пара. Применения включают обнаружение газов (метан, углекислый газ), мониторинг растительности в сельском хозяйстве (через отражение от листьев) и медицинскую диагностику (например, выявление опухолей по тепловому излучению). Детекторы в этом диапазоне часто основаны на полупроводниках, способных реагировать на фотоны средней энергии.

Средневолновый инфракрасный диапазон (от 3 до 8 микрометров). Это "тепловой" диапазон, где излучают объекты с температурами около 100–500 градусов Цельсия (например, выхлопные газы автомобилей или промышленные печи). Атмосфера здесь имеет "окна прозрачности" (места с низким поглощением), что делает его идеальным для тепловизоров в военной технике, пожаротушении и поиске людей под завалами. Шум от фона (атмосферы) выше, поэтому детекторы часто охлаждаются.

Длинноволновый инфракрасный диапазон (от 8 до 15 микрометров). Здесь излучают объекты комнатной температуры (20–40 градусов Цельсия), включая человеческие тела. Это основной диапазон для тепловизоров в медицине (термография для выявления воспалений), строительстве (поиск утечек тепла в зданиях) и экологии (мониторинг океанов). Атмосфера сильно поглощает излучение, но есть прозрачные окна. Детекторы должны быть очень чувствительными к слабым сигналам.

Очень длинноволновый инфракрасный или терагерцовый диапазон (от 15 микрометров до 1 миллиметра). Это переход к микроволнам, где излучают холодные объекты (ниже 0 градусов). Применения: астрономия (наблюдение за звездами), безопасность (сканеры в аэропортах для обнаружения скрытых предметов под одеждой) и медицина (неинвазивная томография).

## 2. Основные механизмы детектирования.

Детектирование инфракрасного излучения основано на двух главных подходах: фотонном (когда излучение поглощается как частицы – фотоны) и тепловом (когда излучение нагревает материал, вызывая изменения свойств). Каждый механизм имеет преимущества и применяется в зависимости от диапазона и условий.

Фотонные механизмы предполагают прямое взаимодействие фотонов с электронами в материале. Фотоны передают энергию, возбуждая электроны, что приводит к изменению электрических свойств.

Фотопроводимость: когда фотон поглощается, он создает пару электрон-дырка, увеличивая проводимость материала. Это как если свет "включает" дополнительные носители заряда. Формула изменения проводимости [2]:

$$\Delta\sigma = e \cdot (\mu \cdot \Delta n + \mu \cdot \Delta p),$$

где:  $e$  – заряд электрона, Кл;  $\mu$  – подвижность,  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $\Delta n$  и  $\Delta p$  – концентрации электронов и дырок,  $\text{м}^{-3}$ .

Применяется в полупроводниках для ближнего и коротковолнового диапазонов. Преимущество: быстрый отклик (наносекунды). Недостаток: требует охлаждения для снижения теплового шума.

Фотодиодный эффект: В p-n-переходе (граница между областями с разными типами проводимости) фотон генерирует ток. Под действием фотона электроны переходят через барьер, создавая напряжение. Это похоже на солнечную батарею, но для инфракрасного тока [2, 3]:

$$I = q \cdot A \cdot (G \cdot \tau),$$

где:  $q$  – заряд, Кл;  $A$  – площадь,  $\text{м}^2$ ;  $G$  – скорость генерации,  $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\tau$  – время жизни носителей, с.

Используется в матрицах для тепловизоров среднего диапазона. Позволяет создавать изображения с высоким разрешением.

Фотоэмиссия: фотон выбивает электрон из материала в вакуум или другой слой. Это как фотоэффект Эйнштейна, но для инфракрасного. Требуется материалов с низкой работой выхода электронов. Применяется в вакуумных трубках для очень чувствительных детекторов, но редко из-за сложности.

Тепловые механизмы основаны на нагреве материала излучением, что меняет его физические свойства. Здесь не важно, сколько фотонов, а сколько энергии в целом.

Болометрический эффект: Излучение нагревает материал, изменяя его электрическое сопротивление. Как термометр, но для излучения. Формула изменения сопротивления [4, 5]:

$$\Delta R = \alpha \cdot R \cdot \Delta T,$$

где:  $\alpha$  – температурный коэффициент,  $\text{К}^{-1}$ ;  $\Delta T$  – прирост температуры, К.

Болометры просты, работают в широком диапазоне (до терагерцового), не требуют охлаждения.

Пироэлектрический эффект: Нагрев меняет спонтанную поляризацию в кристалле, создавая электрический заряд. Это как конденсатор, заряжающийся от тепла. Формула заряда [5]:

$$Q = p \cdot A \cdot \Delta T,$$

где:  $p$  – пироэлектрический коэффициент, Кл/ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $A$  – площадь электрода,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta T$  – прирост температуры, К.

Используется в датчиках движения (PIR-сенсоры в сигнализациях). Отклик медленный, но чувствительность высока к изменениям температуры.

Фото-термоэлектрический эффект: Нагрев создает разность температур между контактами, генерируя напряжение по эффекту Зеебека [6]:

$$V = S \cdot \Delta T,$$

где  $S$  – коэффициент Зеебека, В/К;  $\Delta T$  – прирост температуры, К.

Применяется в материалах с разными свойствами (например, в термопарах). Подходит для широкополосных детекторов без охлаждения.

Фотонные механизмы быстрее и селективнее по длине волны, но чувствительны к шуму. Тепловые – универсальнее, но медленнее и зависят от тепловой инерции.

### 3. Ключевые параметры качества датчиков инфракрасного излучения

Для оценки датчиков используют стандартные характеристики, которые определяют их эффективность. Эти параметры помогают сравнивать разные устройства и материалы.

Отклик (чувствительность): показывает, какой сигнал дает датчик на единицу мощности излучения. Измеряется в амперах на ватт (А/Вт) для фототока или вольтах на ватт (В/Вт) для напряжения [6, 7]:

$$R = V / P,$$

где:  $V$  – напряжение, В;  $P$  – мощность, Вт.

Высокий отклик значит, что датчик реагирует на слабое излучение.

Удельная обнаружительная способность: Комплексный параметр, учитывающий отклик, шум и площадь. Обозначается  $D$ . Формула удельной обнаружительной способности [7]:

$$D = \sqrt{A * \Delta f} / NEP,$$

где:  $A$  – площадь, м<sup>2</sup>;  $\Delta f$  – полоса частот, Гц;  $NEP$  – эквивалентная мощность шума, Вт.

Чем выше  $D$ , тем лучше датчик обнаруживает слабые сигналы на фоне шума.

Шум представляет собой различные помехи, которые ограничивают чувствительность датчика. Чем ниже уровень шума, тем более слабые сигналы способен обнаруживать прибор.

Одним из важных параметров является эквивалентная мощность шума – это минимальная мощность сигнала, которую датчик ещё может отличить от собственного шума. Чем меньше значение  $NEP$ , тем выше чувствительность датчика.

Кроме того, существует  $1/f$ -шум, также называемый низкочастотным или фликкер-шумом. Он особенно заметен на низких частотах и обычно возникает из-за дефектов материала, поверхностных состояний и несовершенств кристаллической структуры [8].

Ещё один распространённый вид – тепловой шум (или джонсоновский шум) [8, 9]. Он появляется вследствие хаотического теплового движения носителей заряда внутри материала. Уровень теплового шума увеличивается при повышении температуры и сопротивления датчика. Чтобы уменьшить тепловой шум, датчик часто охлаждают.

Для снижения общего уровня шума применяют несколько подходов: охлаждение датчика, использование более качественных материалов с меньшим количеством дефектов, сужение рабочей полосы частот, а также специальные схемы фильтрации и обработки сигнала.

Время отклика – это время, за которое сигнал достигает 90% от максимума. Для фотонных – наносекунды, для тепловых – миллисекунды. Зависит от тепловой емкости и диффузии.

Рабочая температура – диапазон, где датчик эффективен. Многие требуют охлаждения (до  $-200^{\circ}\text{C}$ ), но новые материалы позволяют работать при комнатной ( $20-30^{\circ}\text{C}$ ).

Спектральный диапазон – интервал длин волн, на которые реагирует датчик. Широкополосные покрывают от ближнего до терагерцового.

Эти параметры взаимосвязаны: высокий отклик часто сопровождается большим шумом, поэтому оптимизация – ключ к хорошему датчику.

### 4. Графен и другие 2D-материалы в ИК-датчиках

Графен – это одноатомный слой углерода в форме шестиугольной решетки. Он обладает нулевой шириной запрещенной зоны, что означает отсутствие энергетического барьера для электронов. Благодаря этому графен поглощает излучение в очень широком диапазоне – от ультрафиолетового до терагерцового. Коэффициент поглощения одного слоя графена составляет около 2,3 %, но это значение постоянно независимо от длины волны в широком интервале.

Подвижность носителей заряда в графене достигает сотен тысяч квадратных сантиметров на вольт в секунду – это в сотни раз выше, чем в кремнии [9, 10]. Такая высокая подвижность обеспечивает быстрый транспорт зарядов и малое время отклика датчика (на уровне пикосекунд или наносекунд).

Графен демонстрирует сильные эффекты, полезные для детектирования: фототермоэлектрический (когда нагрев от света создает разность потенциалов), боломет-

рический (изменение сопротивления от нагрева) и плазмонный (коллективные колебания электронов, усиливающие поглощение) [11, 12, 13]. Эти механизмы позволяют работать без внешнего напряжения (самопитание) и в широком спектре. Однако низкое поглощение одного слоя – главный недостаток.

#### 5. Анализ тенденций развития высокотемпературной электроники

Проанализируем результаты анализа научной литературы по тематике "перспективы развития высокотемпературной электроники" при помощи программного обеспечения VOSViewer 1.6.20 (<https://www.vosviewer.com>). На рисунке 2 отображена карта взаимосвязей, основанная на тексте более чем 1000 статей открытой базы данных Lens.org (<https://www.lens.org>), содержащих ключевые слова «высокотемпературная электроника», «карбид кремния», «нитрид галлия», «надежность», «термостойкость», «микроэлектроника». Эта карта отражает ключевые понятия и термины, которые упоминаются в научных работах по теме ВТЭ, размер элементов показывает частоту упоминания, связи между ними – упоминание в одной работе, а их взаимное расположение – то, как часто они упоминаются подобным образом. Так, термины из статей схожей проблематики образуют кластеры, а совокупность кластеров и связей между ними является картой взаимосвязей.

Высокий уровень мирового интереса к теме высокотемпературной электроники можно заметить в обзоре, приведенном на рисунке 1. Анализ встречаемости терминов в ключевых словах статей позволяет судить о темпах развития технологий в рассматриваемой области, а также о востребованности научных исследований по различным её аспектам. Высокая степень достоверности результата данного исследования можно приложить к глобальной ситуации, учитывая, что в каждом отдельно взятом регионе приоритеты исследований будут на стороне развития методов использования самых распространенных материалов и устройств.

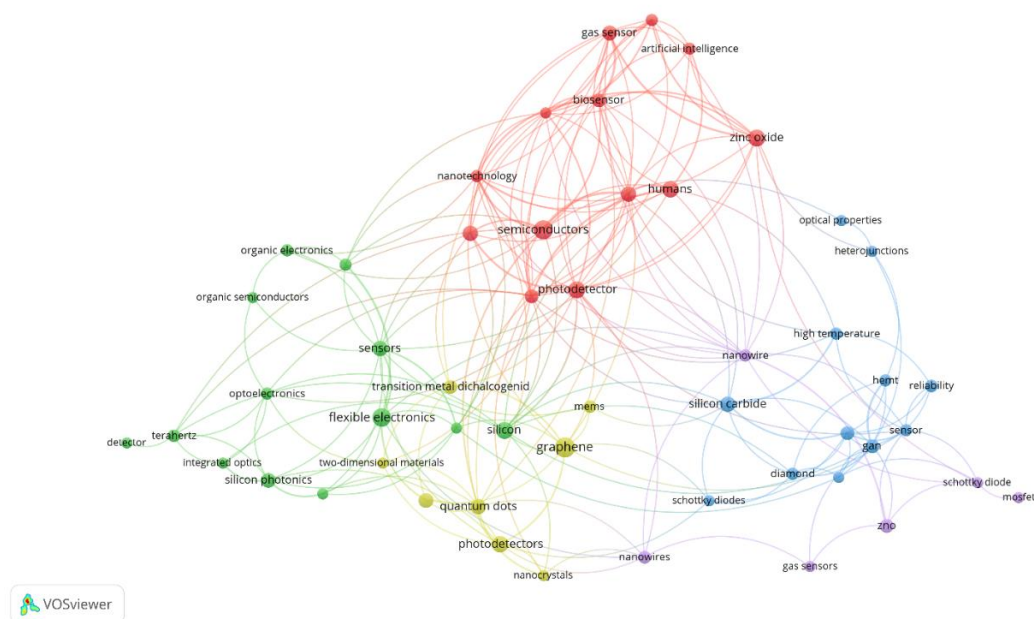


Рисунок 1 – Основные кластеры межатраслевых исследований в области высокотемпературной электроники

В качестве основных на рисунке можно выделить четыре крупных кластера: «Полупроводники и нанотехнологии» (красный), «Органическая электроника» (зелёный), «Высокотемпературные материалы» (синий), «Фотодетекторы и сенсоры» (жёлтый/фиолетовый). Цвета кластеров на рисунке: красный, зелёный, синий и жёлтый соответственно. Рассмотрим каждый из них в отдельности более подробно.

Красный кластер «Полупроводники и нанотехнологии» охватывает наиболее инновационные и междисциплинарные разработки. Исследования направлены на разработку методик синтеза материалов с использованием наноструктур и химии для улучшения термической стойкости. Сильная связь этого кластера с искусственным интеллектом и газовыми сенсорами подчёркивает тренд в сторону энергоэффективных решений. Хотя данный кластер представляет собой отдельное, быстро растущее поле, успешное создание таких сложных устройств, как SiC-MOSFET и GaN-HEMT, критически зависит от надёжной полупроводниковой основы и методов контроля характеристик – аспектов, подробно рассматриваемых в работах, связанных с зелёным кластером [14, 15, 16].

Одновременно с этим, синий кластер наиболее тесно связан с основной темой исследования, концентрируясь на высокотемпературных материалах и устройствах.

Его основные термины – высокая температура, карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN) – указывают на критическую роль в силовой электронике. Связанные термины диод Шоттки, гетеропереходы и надёжность подчёркивают применение этих технологий для калибровки и обеспечения безопасности в авиационных и космических системах. Изучение физических основ, таких как оптические свойства, является неотъемлемой частью этого кластера. Исследования в области высокотемпературных структур, в частности, МДП-структур на SiC, охватывают вопросы накопления и подавления термически-индуцированного заряда [17].

Жёлтый/фиолетовый кластер «Фотодетекторы и сенсоры» объединяет основные метрологические характеристики устройств и базовые компоненты их конструкции. Ключевые метрики чувствительность и надёжность устройств. Базовой технологической основой являются полупроводники – главный материал для создания современных датчиков. Кластер также включает фотодетекторы и область анализа отказов оборудования, что говорит о чрезвычайной важности безотказной работы приборов [18, 19]. Общие тенденции развития промышленных систем, использующих эти устройства, прослеживаются в работах, посвященных концепции цифрового двойника [19] и Интернету вещей (IoT), включая технологические платформы для инфраструктуры и алгоритмы конфигурирования контроллеров «умных машин» на базе IoT [20].

Анализ карты кластеров и массива публикаций указывает на три ключевые тенденции в развитии перспектив высокотемпературной электроники, которые определяют будущие исследовательские векторы. Прежде всего, наблюдается конвергенция и миниатюризация. Происходит сближение традиционных материаловедческих подходов с инновационными направлениями нанотехнологий и гибридных структур. Это выражается в общем стремлении к повышению стойкости и миниатюризации устройств для создания высокоточных, интегрированных и персонализированных решений. Во-вторых, ключевой тенденцией является цифровизация и ИИ. Физическая электроника активно сливается с цифровыми технологиями: машинное обучение используется для прогнозирования дефектов, а концепции Интернета вещей и «умных машин» интегрируются в промышленные и инфраструктурные решения, включая создание цифровых двойников. В-третьих, наблюдается постоянное повышение функциональности аппаратной базы. Исследования направлены на улучшение метрологических характеристик и повышение функциональности полупроводниковой основы. В частности, для высокотемпературных устройств разрабатываются и внедряются новые режимы работы, такие как интеграция с пассивным охлаждением, для компенсации термических эффектов и повышения надежности устройств.

В существующих реалиях можно выделить ведущих игроков в области высокотемпературной электроники, которые развивают и стремятся максимально использовать широкозонные материалы: США, Китай, страны Европейского Союза, Япония и Россия. При этом развитые страны стремятся закрепить свою технологическую независимость в условиях нестабильного рынка полупроводников, располагая значительными ресурсами для научно-технического прогресса в этой области. А развивающиеся промышленные страны стремятся использовать менее дорогостоящие и высокоэффективные материалы для обеспечения своих растущих потребностей. Очевидно, что для достижения своих целей каждая страна стремится построить некую индивидуальную стратегию, однако можно проследить общие тенденции. Двигателем развития высокотемпературной электроники являются растущие потребности производства, а переход к бережливому производству ведёт это развитие в сторону разнообразных аналитических инструментов. Такими инструментами уже сейчас становятся искусственный интеллект, технологии Big Data, а также – системы, основанные на интернете вещей.

#### 6. Типы структур на основе графена

Разработано несколько архитектур датчиков на графене, каждая из которых решает конкретные задачи.

Чистый графен (моно- или многослойный). В таких датчиках используют болометрический или фототермоэлектрический механизм. Например, в фототермоэлектрических датчиках создают асимметрию контактов (разные металлы или разные типы дотирования), чтобы нагрев от света генерировал напряжение [20]. Такие устройства работают в терагерцовом диапазоне при комнатной температуре и имеют время отклика в наносекундах.

Графеновые наноструктуры особенно эффективны в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах – они действуют как антенны, захватывающие излучение. Такие структуры достигают высокой удельной обнаружительной способности и подходят для тепловизоров [21, 22].

Гетероструктуры с другими материалами. Графен часто комбинируют с гексагональным нитридом бора для защиты и снижения шума, или с переходными металлами дихалькогенидами (например, MoS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>). В таких структурах графен обеспечивает

быстрый транспорт зарядов, а TMD – сильное поглощение в определенном диапазоне. Пример: гетероструктура графен/MoS<sub>2</sub> показывает повышенный отклик за счет разделения носителей заряда на границе [23].

Интеграция с плазмонными структурами. Металлические наноантенны (золотые или серебряные) или метаматериалы усиливают локальное поле и поглощение в графене. Это позволяет создавать сверхчувствительные датчики в среднем инфракрасном диапазоне с откликом, значительно превышающим базовый графен [24].

#### 7. Перовскитные материалы для инфракрасных датчиков

##### 7.1. Общие положения

Перовскиты обладают очень высоким коэффициентом поглощения света – до 10<sup>5</sup> см<sup>-1</sup>, то есть тонкий слой (сотни нанометров) уже полностью поглощает падающее излучение [25–33]. Длина диффузии носителей заряда достигает микрометров, а подвижность – десятков-сотен квадратных сантиметров на вольт в секунду. Это значит, что фотоны эффективно создают пары электрон-дырка, а заряды быстро добираются до электродов, давая сильный сигнал.

Ширину запрещенной зоны можно менять от 1,1–1,2 эВ (для оловянных или смешанных Sn-Pb перовскитов) до 2 эВ и выше. Это позволяет детектировать ближний инфракрасный диапазон (до 1000–1100 нм) и даже дальше при специальных подходах. Перовскиты делают растворным методом – смешивают соли в растворителе, наносят на подложку капельным методом, вращением или печатью. Это дешево и позволяет создавать большие площади или гибкие устройства.

##### 7.2. Классические трёхмерные перовскиты для ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазона

Обычные трёхмерные перовскиты типа MAPbI<sub>3</sub> (метиламмоний свинец йодид), FAPbI<sub>3</sub> (формамидиний свинец йодид) или CsPbX<sub>3</sub> (цезий свинец галогенид) имеют ширину запрещенной зоны около 1,5–1,6 эВ. Они хорошо работают в видимом свете, но для инфракрасного их модифицируют [3].

Чтобы расширить диапазон в ближний инфракрасный (780–1050 нм и дальше), используют смешанные Sn-Pb перовскиты [25, 26]. Олово снижает ширину запрещенной зоны до 1,2–1,3 эВ. Такие материалы показывают высокую чувствительность, низкий темный ток и большую удельную обнаружительную способность. Например, Sn-Pb перовскиты достигают внешней квантовой эффективности 70–80 % на длине волны 940 нм, а удельная обнаружительная способность превышает 10<sup>13</sup> джонс [4 – 6].

Для защиты от окисления олова (Sn<sup>2+</sup> → Sn<sup>4+</sup>) применяют добавки, пассивацию дефектов и регуляцию интерфейсов. Это повышает стабильность и снижает шум [7, 8].

##### 7.3. Низкоразмерные перовскиты (двумерные, квази-двумерные, ноль-мерные) для повышения стабильности и инфракрасного отклика

Двумерные перовскиты имеют слоистую структуру, где между слоями органические катионы (например, бутиламмоний или фенилэтиламмоний). Они обозначаются как (RNH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>An<sub>1</sub>BnX<sub>3n+1</sub>, где n – число слоёв перовскита [9, 10].

Преимущества двумерных перовскитов:

высокая устойчивость к влаге и кислороду благодаря гидрофобным органическим слоям;

сильные экситонные эффекты, что полезно для фототермозлектрических и болометрических механизмов;

возможность детектировать средний инфракрасный диапазон (2–10 мкм) при комнатной температуре.

Квази-двумерные (n=2–5) сочетают преимущества трёхмерных (высокая подвижность) и двумерных (стабильность). Они дают высокий отклик в ближнем инфракрасном и подходят для гибких устройств [11].

Ноль-мерные (квантовые точки перовскита) используют для усиления поглощения в инфракрасном, но чаще в комбинации с другими материалами.

##### 7.4. Безсвинцовые перовскиты – тренд для экологических инфракрасных датчиков

Свинец токсичен, поэтому развивают безсвинцовые варианты:

оловянные (FASnI<sub>3</sub>, MASnI<sub>3</sub>, CsSnI<sub>3</sub>) – ширина запрещенной зоны 1,2–1,4 эВ, отклик до 1000–1200 нм.

висмутовые, сурьмяные, медные (Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>I<sub>9</sub>, Cs<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>I<sub>9</sub>, Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub>) – стабильные, но ширина зоны выше, поэтому комбинируют с допированием или гибридами для инфракрасного.

двойные перовскиты – вводят дефекты или промежуточные уровни для расширения диапазона.

Безсвинцовые Sn-Pb (или чисто Sn) с пассивацией достигают низкого темного тока (10 нА/см<sup>2</sup>) и высокой обнаружительной способности. Они интегрируют в матрицы 640×512 пикселей для формирования изображений в ближнем инфракрасном.

#### 7.5. Гибридные структуры и композиты

Гибридные структуры создают, чтобы объединить сильные стороны разных материалов и компенсировать их слабости. В чистом виде графен имеет низкое поглощение излучения (около 2,3 % на слой), но обладает очень высокой подвижностью носителей заряда (сотни тысяч квадратных сантиметров на вольт в секунду) и нулевой шириной запрещенной зоны, что позволяет детектировать широкий диапазон – от ближнего инфракрасного до терагерцового. Перовскиты, напротив, сильно поглощают свет (коэффициент до  $10^5 \text{ см}^{-1}$ ), имеют регулируемую ширину запрещенной зоны и низкую стоимость производства, но страдают от медленного транспорта зарядов, нестабильности к влаге и кислороду, а также высокого уровня шума [14 – 16].

Синергия в гибридах проявляется посредством:

сильное поглощение перовскитов и быстрый транспорт графена: фотоны поглощаются в перовските, создавая пары электрон-дырка. затем электроны быстро перемещаются в графен, где их высокая подвижность обеспечивает сильный сигнал и малое время отклика (наносекунды вместо микросекунд).

расширение диапазона: гибриды позволяют детектировать от ультрафиолетового через видимый и ближний инфракрасный до среднего инфракрасного и терагерцового, без необходимости охлаждения.

повышение стабильности: графен может служить защитным слоем, блокируя влагу и кислород, а перовскиты добавляют механическую прочность.

самопитание и низкое потребление энергии: многие гибриды работают без внешнего напряжения за счет встроенного поля на границе материалов, что полезно для портативных устройств.

дешевое производство: растворные методы (капельная печать, вращение) позволяют наносить слои на гибкие подложки, снижая стоимость.

Например, в гибриде графен/перовскит электроны из перовскита инжектируются в графен под действием света, создавая фотоэффект с усилением. Это приводит к отклику в тысячи ампер на ватт и обнаружительной способности свыше  $10^{15}$  джонс – в разы выше, чем у чистых материалов. Исследования показывают, что такие комбинации решают проблему низкого поглощения графена и нестабильности перовскитов, открывая путь к датчикам для медицины (термография), экологии (обнаружение газов) и автономного транспорта (ночные камеры).

#### Заключение

Развитие инфракрасной фотоники на основе низкоразмерных материалов и гибридных структур открывает широкие возможности для внедрения новых технологий в гражданских и промышленных секторах, таких как автономный транспорт, медицина и системы мониторинга. Современные материалы и инновационные подходы к формированию гетероструктур позволяют значительно расширить температурные диапазоны функционирования датчиков, повышая их надежность и исключая необходимость криогенного охлаждения. Использование графена и перовскитов, как перспективных материалов, способствует созданию датчиков с улучшенными характеристиками чувствительности, быстродействия и стабильности в различных условиях эксплуатации. Эти материалы обладают уникальными оптическими и электронными свойствами, что позволяет значительно увеличивать эффективность инфракрасных датчиков, применяемых в системах мониторинга, медицинской диагностики, а также во многих областях промышленности.

Однако, несмотря на многообещающие результаты, остаются определенные технологические и исследовательские вызовы, касающиеся масштабируемости производства, долговечности и готовности материалов к эксплуатации в реальных условиях. Будущее инфракрасных датчиков во многом зависит от дальнейших исследований, направленных на преодоление этих препятствий. Интеграция новых технологий, таких как наноразмерные и композитные материалы, а также гибкие и самовосстанавливающиеся структуры, открывает новые горизонты для разработки высокоэффективных и адаптивных инфракрасных датчиков.

Перспективы дальнейших исследований и разработок в этой области обещают существенный прогресс, что приведет к созданию новых поколений неохлаждаемых ИК-систем с широким спектром применения. Важным направлением будущих работ является оптимизация технологий синтеза и стабилизации узкозонных перовскитов, а также интеграция их в сложные КМОП-системы для работы в условиях реального времени. Это позволит не только повысить эксплуатационные характеристики устройств, но и снизить их стоимость, что существенно расширит возможности их внедрения в массовое производство и высокотехнологичные отрасли.

Таким образом, дальнейшее развитие науки и технологий в области инфракрасной сенсорики будет способствовать созданию новых инновационных решений с высоким уровнем производительности и функциональности, что, несомненно, окажет положительное влияние на многие сферы современной жизни.



Благодарности: Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSFN-0705-2024-0019.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пильшиков В.Е. Радиационная физика полупроводников. – Москва: Наука, 1990. 384 с.
2. Bader S., Lagger P., Bergmann A., Rysshøj P.S., Reimann M., Schalwig R. Prospects and Challenges of SiC-Based High-Temperature Electronics // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. Vol. 67, No. 10. pp.4125-4137.
3. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. 4-е изд. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. 352 с.
4. Харитонов Ю.И., Шумаков А.В. Полупроводниковые датчики радиации: физика и применение // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 3. С.23-30.
5. Григорьев Н.Н., Кудряшов В.А. Радиационные датчики на основе полупроводниковых структур // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, № 5. С.675-682.
6. Kim J. et al. GaN-based high-temperature electronics: Progress and challenges // Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 129, No. 12. Art. 120901.
7. Шумаков А.В., Свиридов А.С., Колесников С.В. Современные датчики для радиационных мониторов // Атомная энергия. 2011. Т. 110, № 3. С.163-167.
8. Тенишев В.П., Емельяненко И.А. Радиационно-чувствительные плёночные композиции для измерения поглощённых доз // Стандартные образцы. 2019. Т. 15, № 3. С.33-40.
9. Neudeck P.G. et al. Prolonged 500 °C operation of 4H-SiC electronics // IEEE Electron Device Letters. 2019. Vol. 40, No. 7. pp.1082-1085.
10. Черняев А.П., Колыванова М.А., Борщевская П.Ю. Радиационные технологии в медицине // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2015. № 6. С.28-36.
11. Иванов П.А., Шумаков А.В. Технологии тестирования радиационно-чувствительных датчиков на основе МДП-структур // Сборник трудов конференции «Инновационные технологии в приборостроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С.102-110.
12. Butler D.P., Butler T.O., Ramesham R. Diamond-based high-temperature sensors for extreme environments // Sensors and Actuators A: Physical. 2022. Vol. 335. Art. 113356.
13. Wolfspeed. A Cree Company. SiC MOSFET Gen 3 Datasheet // Wolfspeed Technical Report. 2023. 12 p.
14. Углов А.А., Дедков Г.В. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – Москва: Наука, 1973. 320 с.
15. Neudeck P.G., Okojie R.S., Chen L.-Y. High-Temperature Electronics – A Role for Wide Bandgap Semiconductors // Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90, No. 6. pp.1065-1076.
16. Воднарь Д.А. Полупроводниковая микроэлектроника – 2023 г. Часть 1. Широкозонные полупроводники раздвигают горизонты достигнутого // Электронные компоненты. 2023. № 12. С.45-58.
17. Fan K., Guo J., Huang Z. et al. GaN-on-diamond technology for next-generation power devices // Moore and More. 2025. Vol. 2, No. 1. Art. 8.
18. Arivazhagan L., Nirmal D., Chander S., Ajayan J. GaN HEMT on Si substrate with diamond heat spreader for high power applications // Journal of Computational Electronics. 2021. Vol. 20. pp.1-10.
19. Helou A.E., Komarov P., Tadjer M.J. Intrinsic and Extrinsic Thermal Conductivities of Gallium Nitride and Silicon Carbide // Springer Handbook of Materials Modeling. Cham: Springer, 2024. pp.1-25.
20. Johnson R.W., Hultman L., Klofsten M. An overview of high-temperature electronic device technologies and potential applications // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 1996. Vol. 19, No. 4.
21. Laurent M.A., Malakoutian M., Chowdhury S. Development of 300-400 °C grown diamond for semiconductor devices thermal management // MRS Advances. 2023. Vol. 8. pp.1-10.
22. Жалнин В.П., Влохин М.С., Бубнов В.С., Мельников Д.В. Анализ возможностей применения графена в электронике // Технологии инженерных и информационных систем. 2024. № 3. С. 82-101.
23. Shepherd P., Smith S.C., Holmes J. et al. A robust, wide-temperature data transmission system for space environments // IEEE Aerospace Conference. 2013. pp.1-13.
24. Willet M., Ward M., Behbahani A. Using high temperature electronics for distributed controls of turbine engines // 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, TN, 25-28 July 2010. pp.1-13.
25. Bazhenov K.E., Vlasov A.I., Zhailnin V.P., Gilmanov R.M., Kravets G.I. Use of perovskites for optosensors // E3S Web of Conferences. Kuban State Agrarian University. 2023. N. 01040.
26. Алимова П.Д., Жалнин В.П., Лобанова К.А., Селиванов К.В. Перспективы использования элементной базы на основе перовскита в солнечной энергетике // Датчики и системы. 2023. № 2 (267). С. 36-43.
27. Артемьев Б. В., Власов А. И., Жалнин В. П., Кулемин А. С., Сварян В.П. Будущее радиационно-чувствительных технологий: от традиционных датчиков до интеллектуальных измерительных систем // Датчики и системы. 2026. № 1 (285). С.3-12.
28. Жалнин В.П., Шахнов В.А. Оптодатчики на базе перовскитов для интраоперационной IN-SITU диагностики // Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем. Труды Международной научно-технической конференции. – Москва, 2023. С. 4-5.
29. Жалнин В.П., Москвин Г.А., Лисица А.Е., Селиванов К.В. Анализ многофункциональных сенсоров радиационных излучений с возможностью определения энергии и видов излучения // Датчики и системы. 2025. № 2 (280). С.16-25.
30. Артемьев В.В., Жалнин В.П., Гайворонский А.И., Калинин К.Д. Многофункциональные датчики радиационного излучения на основе МДП-структур: принципы, технологии и методы калибровки // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28. № 10 (328). С. 41-50.
31. Жалнин В.П., Квасов А.А., Ринчиндоржиев А.Ч., Кретинин Н.А. Улучшение чувствительности сенсорных полимерных плёнок посредством изменения структуры // Технологии инженерных и информационных систем. 2025. № 1. С. 15-25.
32. Андреев В.В., Жалнин В.П., Столяров А.А. Физические основы микро- и нанoeлектроники. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. 292 с. (Библиотека «Приборостроение». Т. 3).
33. Власов А.И., Жалнин В.П., Селиванов К.В. Физико-химические основы приборостроения: учеб. пособие. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 531 с. (Библиотека «Приборостроение».Т. 11).

УДК 621.38

**Жалнин<sup>1</sup> В.П., Аленичева<sup>2</sup> А.А., Золотова<sup>3</sup> М.А.**

<sup>1,2,3</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1,2,3</sup> zhalnin@mail.ru

### **ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ**

**Аннотация.** Рассматриваются проблемы использования традиционных материалов для создания радиационных датчиков и перспективы их замены на экологически чистые альтернативы. Анализируются новые материалы, такие как гибридные перовскиты, органические полупроводники и биоразлагаемые вещества, а также их потенциал для повышения чувствительности и безопасности детекторов. Особое внимание уделяется необходимости междисциплинарного сотрудничества между учеными, производителями и экологическими организациями для успешной разработки и внедрения инновационных радиационных датчиков. Обсуждаются вызовы и возможности перехода на экологически устойчивые технологии в области радиационного контроля и их влияние на здоровье человека и окружающую среду.

**Ключевые слова:** радиационные датчики, экологически чистые материалы, гибридные перовскиты, органические полупроводники, биоразлагаемые материалы, радиационный контроль, устойчивые технологии

**Zhalnin<sup>1</sup> V.P., Alenicheva<sup>2</sup> A.A., Zolotova<sup>3</sup> M.A.**

<sup>1,2,3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1,2,3</sup> zhalnin@mail.ru

### **ECO-FRIENDLY MATERIALS FOR RADIATION SENSOR DEVELOPMENT: CHALLENGES AND SOLUTIONS**

**Abstract.** The article addresses the challenges of using traditional materials for radiation sensor fabrication and explores the prospects of replacing them with eco-friendly alternatives. It analyzes new materials such as hybrid perovskites, organic semiconductors, and biodegradable substances, as well as their potential to enhance the sensitivity and safety of detectors. Special attention is given to the need for interdisciplinary collaboration among scientists, manufacturers, and environmental organizations to successfully develop and implement innovative radiation sensors. The discussion covers the challenges and opportunities of transitioning to environmentally sustainable technologies in radiation monitoring and their impact on human health and the environment.

**Keywords:** radiation sensors, eco-friendly materials, hybrid perovskites, organic semiconductors, biodegradable materials, radiation monitoring, sustainable technologies

#### **Введение**

В современном мире радиационные датчики играют ключевую роль в обеспечении безопасности на промышленных предприятиях, в медицинской диагностике, экологическом мониторинге и ядерной энергетике. На рисунке 1 представлена типовая схема дозиметра, иллюстрирующая основные компоненты устройства. Точность и надежность детекторов ионизирующего излучения напрямую влияют на эффективность контроля радиационной обстановки и защиту здоровья человека. Однако использование традиционных материалов (свинца, германия и кремния) для создания таких датчиков часто сопряжено с экологическими и токсикологическими рисками. Их производство, эксплуатация и утилизация наносят значительный вред окружающей среде и создают угрозу для здоровья человека.

В связи с возрастающими требованиями к экологической безопасности, возникает необходимость поиска и внедрения экологически чистых материалов для создания радиационных датчиков. Такие материалы должны не только обеспечивать высокую чувствительность и стабильность работы устройств, но и минимизировать негативное воздействие на природу и человека.

Цель статьи – провести обзор современных экологически безопасных альтернатив традиционным материалам, рассмотреть их свойства и потенциал применения для обнаружения радиации, а также проанализировать существующие проблемы и пути их решения.

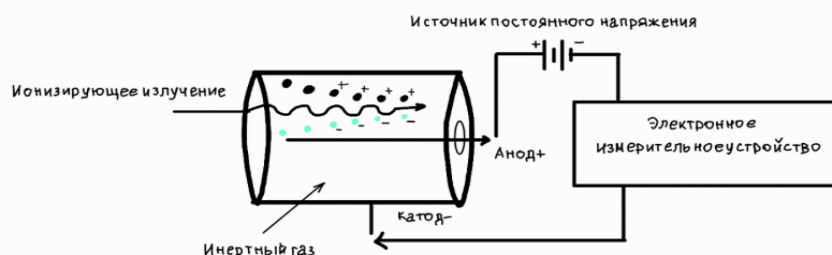


Рисунок 1 – Дозиметр. Схема (иллюстрация авторов)

Таким образом, статья направлена на систематизацию знаний о новых материалах и технологиях, способствующих созданию эффективных и экологически безопасных

радиационных датчиков, что актуально для научного сообщества, производителей и специалистов в области радиационной безопасности.

Традиционные материалы для датчиков радиационных излучений

Радиационные датчики традиционно изготавливаются из различных полупроводниковых и тяжелых материалов\*, которые обеспечивают необходимую чувствительность и точность в детекции ионизирующего излучения. Наиболее распространенными из них являются германий и кремний.

Германий обладает отличными полупроводниковыми свойствами и высокой чувствительностью к гамма-излучению. Он широко применяется в высокоточных детекторах, но его производство требует значительных затрат и энергии, что сопряжено с экологическими проблемами, такими как загрязнение окружающей среды и истощение ресурсов [1, 2].

Кремний, как более доступный и менее токсичный материал, также используется в радиационных датчиках, однако его эффективность в детекции высоких энергий излучения ниже по сравнению с германием. Кроме того, кремниевые компоненты, в частности МЭМС-датчики и МОП-структуры, подвержены деградации под воздействием ионизирующего излучения, что проявляется в накоплении заряда в диэлектриках и образовании дефектов кристаллической решетки, что требует проведения специальных испытаний и прогнозирования их радиационной стойкости, а также разработки специализированных чувствительных элементов [3 – 15].

В таблице 1 представлено сравнение германия и кремния по трем показателям: токсичность, эффективность и стоимость. Эффективность показывает, насколько хорошо материал способен обнаруживать и поглощать гамма-излучение или другие виды радиации.

Сравнительный анализ германия и кремния

Таблица 1

| Параметр      | Германий (Ge)                                                                                | Кремний (Si)                                                          |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Токсичность   | Средняя<br>(относительно безопасен, но требует осторожности при обработке)                   | Очень низкая<br>(безопасен, широко используется в электронике)        |
| Эффективность | Высокая<br>(хорошие полупроводниковые свойства, но высокая стоимость в сравнении с кремнием) | Высокая<br>(основной материал для полупроводников, отличные свойства) |
| Стоимость     | Высокая<br>(дорогой и редкий материал)                                                       | Низкая/средняя<br>(доступный, массово производимый)                   |

Несмотря на свои преимущества, использование традиционных материалов для создания радиационных датчиков имеет ряд недостатков. Например, германий представляет опасность для здоровья человека, включая нарушения в работе нервной системы и увеличение риска развития онкологических заболеваний при длительном контакте [4]. Его добыча и переработка может приводить к загрязнению окружающей среды, что подчеркивает необходимость поиска более безопасных и устойчивых альтернатив для создания датчиков радиационного излучения [5]. Необходимость такого перехода также обусловлена глобальной задачей снижения радиационного воздействия на электронные компоненты в космической и ядерной отраслях [16 – 21].

Таким образом, традиционные материалы для радиационных датчиков, хотя и обеспечивают высокую эффективность, имеют серьезные недостатки, которые требуют внимания и поиска экологически чистых заменителей. Это подчеркивает важность дальнейших исследований в области разработки новых материалов, которые могут обеспечить необходимую чувствительность при минимизации негативного воздействия на здоровье человека и окружающую среду [6].

\*Тяжелые материалы – вещества с высокой плотностью и большой атомной массой. В контексте радиационных датчиков это материалы, которые эффективно поглощают ионизирующее излучение благодаря своей плотности и атомному номеру.

Экологически чистые альтернативы для датчиков радиационных излучений

#### 2.1 Тенденции развития материалов для датчиков радиационных излучений

В настоящее время большое внимание уделяется созданию новых материалов, которые могут заменить традиционные.

Тенденции развития материалов для датчиков радиационных излучений сосредоточены на повышении чувствительности, радиационной стойкости, миниатюризации и возможности работы при комнатной температуре.

Использование наноматериалов и композитов предполагает использование нанополимеров золота, палладия (нано-112) и углеродных материалов для повышения чувствительности датчиков, создание композитов, совмещающих высокие конструкционные и радиационно-защитные свойства.

Развитие полупроводниковых детекторов предполагает переход от традиционных материалов к материалам с широкой запрещенной зоной, что позволяет датчикам работать при высоких температурах и при более высоком уровне радиации без специального охлаждения.

Отдельные решения базируются на применении гидрогелей, новые полимеров и суперабсорбентов, включая их модификацию с помощью радиации.

Повышение радиационной стойкости достигается за счет применения полимеров с высокой устойчивостью к излучениям, таких как поликарбонаты (ПК) и полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), способных выдерживать высокие дозы гамма- и нейтронного излучения.

Эти тенденции направлены на создание датчиков нового поколения, способных функционировать в экстремальных условиях, обеспечивая при этом точные измерения, что необходимо в ядерной энергетике, космической отрасли, медицине и ряде других отраслей.

Рассмотрим несколько перспективных направлений в этой области: гибридные перовскиты, органические полупроводники и биоразлагаемые материалы.

## 2.2 Гибридные перовскиты

Перовскит — это кристаллический материал с формулой  $ABX_3$  и кристаллической структурой, схожей со структурой минерала перовскита, который состоит из оксида титана и кальция ( $CaTiO_3$ ). На рисунке 2 представлена типовая кристаллическая структура перовскита с ионом В в центре. 'А' и 'В' — это положительно заряженные ионы (т. е. катионы), часто очень разного размера, а X — отрицательно заряженный ион (анион, часто оксид), который связывается с обоими катионами.

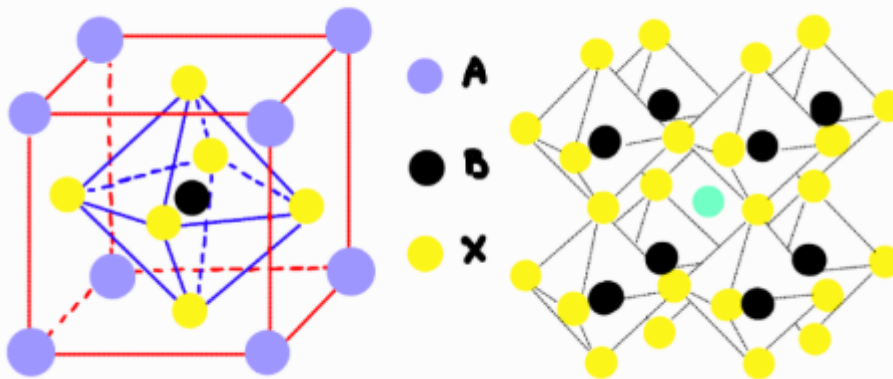


Рисунок 2 – Типовая кристаллическая структура перовскита типа  $ABX_3$  с ионом В в центре (иллюстрация авторов)

Благодаря своей структуре, перовскиты обладают высокой фотолюминесценцией и высокой мобильностью зарядов, что важно для регистрации высокоэнергетических частиц.

Гибридные перовскиты представляют собой новый класс материалов, сочетающих в себе преимущества традиционных перовскитов и других полупроводниковых соединений. Гибридные перовскиты обладают высокой светочувствительностью и химической стабильностью, что делает их идеальными для использования в радиационных датчиках. Их уникальная структура позволяет улучшить радиационную чувствительность и стабильность при различных условиях эксплуатации. Гибридные перовскиты могут быть использованы для создания компактных и эффективных датчиков, способных детектировать различные виды излучения с высокой точностью. На рисунке 3 представлена фотография сцинтиллятора  $MAPbBr_3$  SC (гибридный перовскит) с прессованной таблеткой  $Gd_2O_3$ , использованной как поглотитель/преобразователь нейтронов, что повышает эффективность обнаружения гамма-лучей [8].

Рассматривая перовскиты, необходимо учитывать их состав. Многие высокоэффективные гибридные перовскиты, такие как  $MAPbBr_3$ , содержат токсичный свинец. В этих материалах свинец является ключевым компонентом светопоглощающего слоя, который непосредственно преобразует энергию ионизирующего излучения в измеримый электрический сигнал или сцинтилляцию. Это принципиально отличает его роль от традиционного использования свинца в радиационной защите, где его высокая плотность используется для пассивного экранирования (например, в свинцовой фольге для фильтрации гамма-излучения в детекторах). Однако токсичность свинца и негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду вызывают серьезные опасения, особенно при утилизации устройств, его содержащих [1].

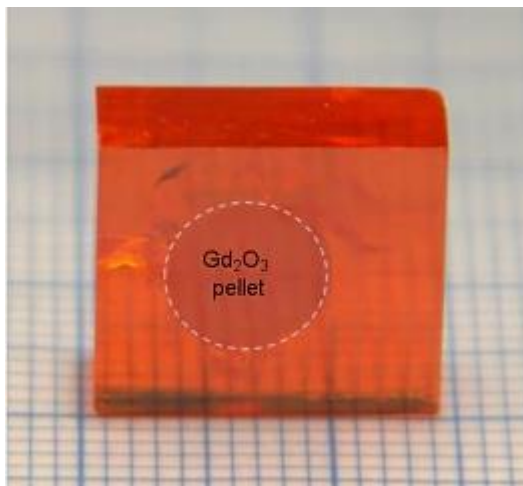


Рисунок 3 – Внешний вид сцинтиллятора  $\text{MAPbBr}_3$  SC (гибридный перовскит) с таблеткой  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  [8]

### 2.3 Органические полупроводники

Органические полупроводники представляют собой класс материалов, в которых полупроводниковые свойства проявляются в органических молекулах или полимерах. Органические полупроводники обладают рядом уникальных свойств, таких как лёгкость модификации, гибкость, быстрое время отклика и возможность интеграции в различные устройства. Благодаря этим свойствам они активно применяются в радиационных датчиках. Органические полупроводники могут быть использованы для создания лёгких и чувствительных детекторов радиации, которые способны быстро реагировать на изменения радиационного фона [9].

### 2.4 Биоразлагаемые материалы

Биоразлагаемые материалы используются для создания более экологичных датчиков радиационной детекции, которые после окончания срока службы саморазрушаются без негативного воздействия на окружающую среду. Ключевая особенность биоразлагаемых датчиков заключается в их способности преобразовывать ионизирующее излучение в видимый свет. Этот световой сигнал регистрируется встроенным датчиком и преобразуется в электрический сигнал, который может быть обработан и проанализирован системой. Биоразлагаемые материалы обладают рядом уникальных свойств, которые делают их идеальными для применения в датчиках радиационной детекции: стабильность и надёжность, экологичности и контролируемое разложение в течение заданного срока [10].

Таким образом, развитие этих материалов открывает путь к созданию нового поколения радиационных детекторов, сочетающих высокую эффективность, экологическую безопасность и широкие возможности применения – от медицинской диагностики до мониторинга окружающей среды. Однако для их массового внедрения необходимо решить ряд технологических задач, включая повышение стабильности перовскитов, улучшение чувствительности органических детекторов и оптимизацию характеристик биоразлагаемых датчиков. Эти направления могут не только снизить экологическую нагрузку, но и расширить функциональные возможности радиационных детекторов в будущем.

Технические и эксплуатационные требования к экологически чистым материалам в датчиках радиационных излучений

При создании датчиков радиационных излучений с использованием экологически чистых материалов необходимо учитывать комплекс технических, экологических и эксплуатационных требований, обеспечивающих высокую эффективность, надёжность и безопасность приборов в различных условиях эксплуатации.

Во-первых, материалы должны обладать высокой чувствительностью и селективностью к радиационному излучению при минимальном уровне фонового шума, что обеспечивает точность и достоверность измерений. Например, органические полимеры с нанокомпозитными добавками демонстрируют улучшенные детектирующие характеристики [1]. Кроме того, гибридные перовскиты, обладающие высокой светочувствительностью и химической стабильностью, позволяют создавать компактные и эффективные датчики с улучшенной радиационной чувствительностью [8].

Во-вторых, устойчивость материалов к длительному воздействию радиации является критически важным фактором для сохранения физических и химических свойств датчика на протяжении всего срока службы. Пьезоэлектрические материалы [5], характеризуются высокой радиационной стойкостью и стабильностью параметров. Для микроэлектронных компонентов датчиков радиационная стойкость обеспечивается за счет применения специальных технологий производства и конструктивных решений,

направленных на минимизацию образования состояний на границах раздела фаз и в объеме диэлектриков [19 – 34], а также за счет использования стойких к излучению материалов, таких как карбид кремния (SiC) [24]. Аналогично, органические полупроводники обладают быстрым временем отклика и стабильностью, что способствует надежной работе в условиях изменяющегося радиационного фона [9].

В-третьих, экологические требования диктуют необходимость использования материалов, не выделяющих токсичных веществ в процессе эксплуатации и утилизации, а также обладающих возможностью биоразложения. Применение биоразлагаемых материалов в датчиках радиационной детекции позволяет создавать экологичные устройства, которые после окончания срока службы разлагаются без негативного воздействия на окружающую среду, сохраняя при этом стабильность и надежность работы в течение заданного срока эксплуатации [4, 10].

Гибридные органо-неорганические перовскиты, такие как  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , демонстрируют высокую чувствительность к ионизирующему излучению, низкий уровень шума и возможность низкотемпературной обработки. Однако наличие свинца в их составе вызывает обеспокоенность с точки зрения экологии. В связи с этим ведутся активные исследования по замещению свинца на менее токсичные элементы, такие как висмут (Bi), олово (Sn) и сурьма (Sb).

Исследования показывают, что перовскиты на основе Bi и Sb, такие как  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  и  $\text{Cs}_3\text{Sb}_2\text{I}_9$ , обладают приемлемыми фотоэлектрическими свойствами и значительно меньшей токсичностью по сравнению с традиционными свинцовыми аналогами. Кроме того, такие материалы демонстрируют устойчивость к радиационному повреждению и стабильность при длительной эксплуатации, что делает их перспективными кандидатами для применения в медицинской и космической электронике. Их совместимость с методами печатной электроники также открывает путь к масштабируемому и экономичному производству датчиков [24–27].

Современные технологии производства, включая 3D-печать, способствуют минимизации отходов и повышению качества изготовления приборов, что дополнительно снижает экологический след производства [4]. Контроль качества и неразрушающий контроль изделий электронной техники после облучения также играют ключевую роль в обеспечении надежности [18].

Органические полупроводники демонстрируют не только высокую чувствительность, но и устойчивость к механическим деформациям, что делает их особенно привлекательными для гибкой и носимой электроники. Кроме того, возможность химической модификации структуры полимеров позволяет настраивать их спектральный отклик и повышать селективность к различным видам излучения [28, 29].

Наконец, эксплуатационные требования включают долговечность, надежность, устойчивость к механическим и температурным воздействиям, а также удобство обслуживания датчиков. Используемые малогабаритные источники питания и электронные компоненты должны соответствовать стандартам безопасности и экологичности [7]. Для критически важных применений обязательным является проведение цикла испытаний на радиационную стойкость по международным стандартам, что позволяет гарантировать работоспособность аппаратуры в условиях воздействия ионизирующих излучений [30, 32].

На рисунке 4 представлены качественные зависимости чувствительности радиационных датчиков от температуры и уровня радиационного воздействия. Температурная зависимость описывается гауссовой функцией с максимумом при оптимальной температуре [15, 34]:

$$S_{\text{тем}}(T) = A_{\text{exp}} \left( -\frac{(T - T_0)^2}{2\sigma^2} \right),$$

что отражает снижение чувствительности при отклонении температуры из-за физических ограничений материалов датчика. Зависимость от радиации моделируется логарифмической функцией [15, 34]:

$$S_{\text{рад}}(R) = B + C \ln(1 + R),$$

которая учитывает рост сигнала с насыщением при высоких уровнях радиации, обусловленный ограничениями сенсорной системы. Такой подход позволяет адекватно описать влияние ключевых факторов на работу датчиков, что важно для их корректного использования и анализа измерений.

Как видно из рисунка 4, предложенные модели адекватно описывают ключевые зависимости, влияющие на работу радиационных датчиков.

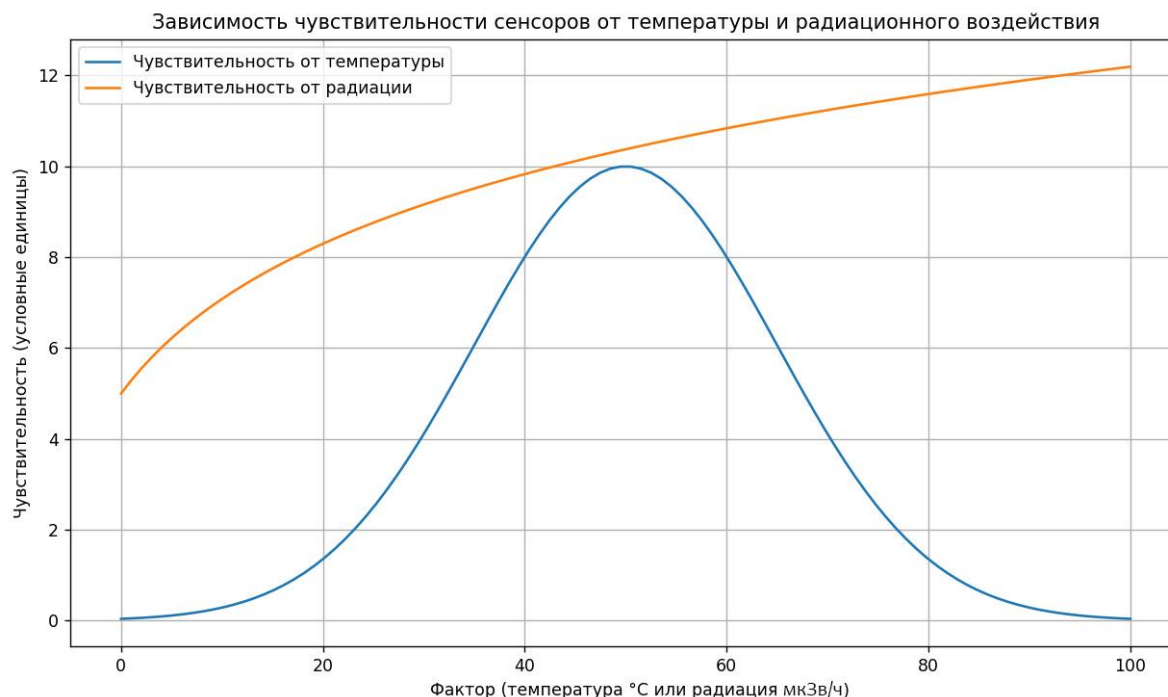


Рисунок 4 – График чувствительности датчиков от различных факторов на примере температуры и радиационного воздействия

Температурная зависимость (синяя кривая) имеет ярко выраженный максимум в точке оптимальной температуры работы  $T_0$ . При отклонении от этого значения в любую сторону чувствительность датчика существенно падает. Это свидетельствует о том, что многие материалы, особенно перовскиты и органические полупроводники, имеют узкий оптимальный температурный диапазон. Следовательно, для их стабильной работы в полевых условиях необходимы системы термостабилизации или разработка материалов с более широким рабочим температурным окном.

Зависимость от уровня радиации (оранжевая кривая) демонстрирует нелинейный характер: на начальном участке наблюдается быстрый рост сигнала, который с увеличением дозы замедляется, приближаясь к насыщению. Такое поведение характерно для детекторов, где количество активных центров, способных регистрировать излучение, ограничено. Это указывает на необходимость калибровки датчиков для конкретного диапазона измеряемых доз и на ограничения их применения в условиях экстремально высокого радиационного фона без дополнительной модификации.

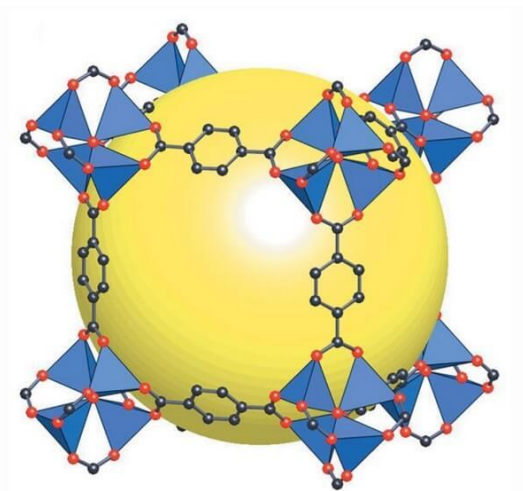
Таким образом, комплексное соблюдение технических, экологических и эксплуатационных требований при выборе материалов и технологий изготовления датчиков радиационных излучений является ключевым условием создания современных, эффективных и безопасных приборов контроля радиации, способных удовлетворить растущие потребности в медицине, промышленности и охране окружающей среды.

#### Примеры успешных внедрений

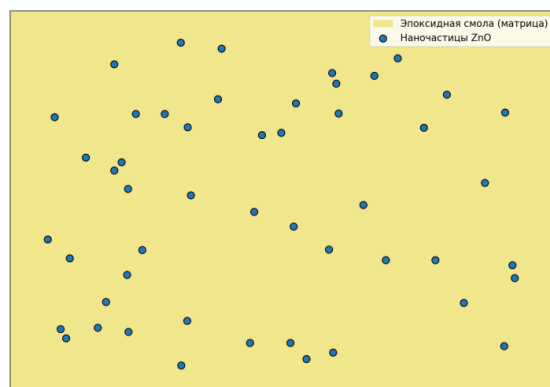
В последние годы активно исследуются новые материалы для радиационного контроля, стремясь создать более эффективные, экологически безопасные и универсальные решения. Традиционные материалы, такие как свинец, германий и кремний, несмотря на их широкое применение, обладают существенными недостатками. На их фоне особую актуальность приобретают разработки новых материалов, сочетающих высокую чувствительность к излучению с минимальным воздействием на окружающую среду.

Создан гибкий органический материал для портативных рентгеновских аппаратов и датчиков радиации без тяжелых металлов. Материал, основанный на металлоорганических каркасах (МОК), состоит из ионов металлов и органических соединений, что делает его пористым и прочным. На рисунке 6 можно увидеть пример строения такого каркаса. Исследователи обнаружили, что МОК из органического вещества DABDT и никеля чувствительны к рентгеновскому излучению с энергией 20 кэВ. Они могут увеличивать электрическое сопротивление при облучении, что позволяет использовать их в датчиках радиации и медицинских рентгеновских аппаратах. Этот материал превосходит другие гибкие материалы по чувствительности и открывает возможности для создания носимых датчиков радиации и стационарных рентгеновских аппаратов [11].



Рисунок 6 – Структура МОК-5 ( $\text{Zn}_4\text{O}[\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2]_3$ ) [ 34 ]

Инновационный композит на основе эпоксидной смолы с наночастицами оксида цинка ( $\text{ZnO}$ ), его структура на основе эпоксидной смолы представлена на рисунке 7, эффективно ослабляет рентгеновское и гамма-излучение, превосходя традиционные полимеры. Добавление цинка увеличивает экранирующие свойства, позволяя создавать лёгкие и компактные защитные конструкции. Композитные материалы перспективны для ядерной энергетики благодаря устойчивости к высоким температурам и химическим воздействиям, а также регулируемым механическим характеристикам. Они экологически безопасны, не наносят вреда окружающей среде и эффективно экранируют труднодоступные зоны. Эпоксидная смола проста в производстве и экономична, а увеличение толщины слоя компенсирует её меньшую эффективность по сравнению со свинцом. Этот материал открывает широкие возможности для применения в медицине, промышленности и других областях, требующих надёжной защиты от радиации [12].

Рисунок 7 – Структура композита на основе эпоксидной смолы с наночастицами оксида цинка ( $\text{ZnO}$ )

Перспективными также являются многослойные диэлектрические структуры в полевых транзисторах на основе оксидов, которые демонстрируют управляемое накопление радиационно-индуцированного заряда и могут быть использованы в качестве высокочувствительных элементов дозиметров [16].

Благодаря высокой чувствительности, гибкости и экологической безопасности, данные материалы могут стать основой для создания более эффективных и универсальных систем радиационного мониторинга, что особенно важно для медицины, ядерной энергетики и космических исследований. Дальнейшие исследования и разработки в этой области будут способствовать созданию ещё более совершенных устройств, отвечающих современным требованиям безопасности и эффективности.

Перспективы развития и решения существующих проблем

Развитие экологически чистых материалов для датчиков радиационных излучений открывает новые горизонты в области радиационного контроля, однако сопровождается рядом технических и технологических трудностей, требующих комплексного подхода к их решению.

Одной из ключевых проблем является стабильность и долговечность новых материалов, особенно гибридных перовскитов. Несмотря на их высокую светочувствительность и эффективность детекции, перовскиты подвержены деградации под воздействием влаги, кислорода и температуры, что ограничивает их применение в длительных и экстремальных условиях эксплуатации [8]. Для решения этой проблемы



разрабатываются методы пассивации поверхности, улучшения кристаллической структуры и внедрения защитных покрытий, что способствует повышению их стабильности и срока службы. На рисунке 8 приведены примеры процесса пассивации.

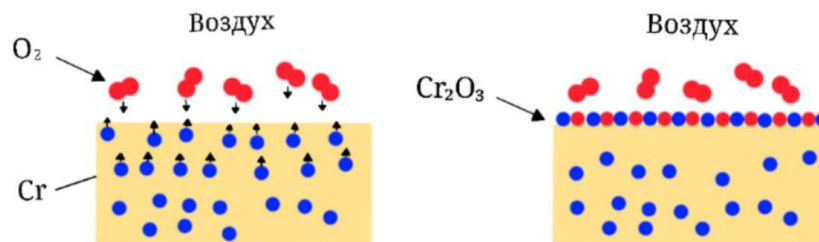


Рисунок 82 – Процесс пассивации на примере хрома (иллюстрация авторов)

Как отмечается в [33], для повышения стабильности перовскитных и органических датчиков необходимы эффективные методы инкапсуляции, защищающие активные слои от влаги и кислорода.

Органические полупроводники, обладающие гибкостью и быстрым временем отклика, требуют оптимизации чувствительности и селективности к различным видам излучения. Современные исследования направлены на синтез новых молекулярных структур и нанокмозитов, которые улучшают электрические характеристики и устойчивость к радиационному воздействию [9, 11]. При этом ключевой задачей остается моделирование радиационных эффектов в новых материалах для точного прогнозирования их поведения в условиях длительного облучения [22, 26, 27]. Кроме того, интеграция органических датчиков с микроэлектронными системами позволяет создавать компактные и энергоэффективные устройства для портативного и стационарного использования.

Широкое применение получили датчики ионизирующих излучений на основе RADFET (Radiation-sensing Field Effect Transistor – это радиационно-чувствительные полевые транзисторы). Они применяются для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения (гамма-лучи, рентген, электроны, протоны). К основным преимуществам таких датчиков следует отнести [35]: малые размеры и интеграция, низкое энергопотребление, интегрирующий характер измерений за счет накопления заряда в диэлектрике, пропорционального поглощенной дозе, что позволяет измерять суммарную (интегральную) дозу облучения за длительный период, возможность быстрого получения данных о радиационном воздействии, выходной сигнал (изменение порогового напряжения) легко поддается цифровой обработке, обладают чувствительностью к минимальным аномалиям, что критично в космической отрасли и при исследованиях космических излучений и низкую стоимость. Эти датчики особенно востребованы в космической технике, а также при дозиметрическом контроле на платах (в т.ч. для контроля работы памяти и микроконтроллеров)

Биоразлагаемые материалы, несмотря на экологическую привлекательность, сталкиваются с проблемой балансирования между контролируемым разложением и сохранением функциональных свойств в течение необходимого эксплуатационного периода. Разработка multifunctional биоразлагаемых композитов с регулируемой скоростью деградации и стабильностью сигнала является перспективным направлением, обеспечивающим экологичность без потери надежности детекции [4, 10].

Кроме того, внедрение современных технологий производства, таких как 3D-печать и нанофабрикация, позволяет создавать сложные архитектуры датчиков с минимальными отходами и высокой точностью исполнения, что снижает экологический след производства и повышает качество устройств [4]. Однако масштабирование этих технологий и обеспечение их экономической эффективности требуют дальнейших исследований.

Наконец, для массового внедрения экологически чистых материалов необходима стандартизация методов оценки их радиационной чувствительности, долговечности и экологической безопасности. Создание международных нормативов и протоколов испытаний обеспечит надежность и сравнимость результатов, что ускорит коммерциализацию новых сенсорных технологий. За основу таких нормативов могут быть взяты хорошо зарекомендовавшие себя методы испытаний микроэлектронных компонентов на стойкость к полной поглощенной дозе и одиночным сбоям [20, 30].

Таким образом, преодоление существующих вызовов посредством междисциплинарных исследований и инновационных технологий позволит создать новое поколение радиационных детекторов, сочетающих высокую эффективность, экологическую безопасность и широкие возможности применения – от медицины и промышленности до мониторинга окружающей среды и космических миссий. Активное сотрудничество научного

сообщества, промышленности и регуляторных органов станет ключевым фактором успешной реализации этих перспектив.

#### Заключение

Переход на экологически чистые материалы для создания радиационных датчиков является важным шагом к обеспечению безопасности и защиты окружающей среды. Традиционные материалы, такие как свинец, германий и кремний, хотя и обеспечивают необходимую чувствительность, сопряжены с серьезными токсикологическими и экологическими рисками. Поэтому поиск и внедрение безопасных альтернатив становятся актуальными задачами для научного сообщества и промышленности.

Перспективы дальнейших исследований и разработок в области экологически чистых материалов, таких как гибридные перовскиты, органические полупроводники и биоразлагаемые материалы, открывают новые горизонты для создания эффективных и безопасных радиационных датчиков. Эти материалы обладают уникальными свойствами, которые могут значительно улучшить характеристики детекторов и снизить их негативное воздействие на природу.

Важным аспектом успешной реализации этих технологий является сотрудничество между учеными, производителями и экологическими организациями. Совместные усилия позволят не только ускорить разработку и внедрение новых материалов, но и обеспечить их соответствие высоким стандартам безопасности и экологичности. Только через интеграцию знаний и ресурсов можно достичь значительных успехов в создании радиационных датчиков, которые будут эффективными, безопасными и устойчивыми к вызовам современности.

Благодарности: Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSFN-2024-0086.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеев А. А., Иванов В. И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М.: Энергоатомиздат, 2009. С. 45-78, 120-135.
2. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерения: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. Гл. 3, 5, с. 89-110, 200-220.
3. Никитин Д.П., Новиков Ю.В. Окружающая среда и человек. М.: Высшая школа, 1986. Гл. 4, с. 150-190.
4. Муравьева С.И., Буковский М.И., Прохорова Е.К. и др. Руководство по контролю вредных веществ в воздухе рабочей зоны: Справочное издание. М.: Химия, 2011. Гл. 2, 6, с. 55-80, 210-235.
5. Зеленко И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах. М.: Мир, 2001. Гл. 1-3, с. 10-65.
6. Чечик Н. О., Файнштейн С. М., Лифшиц Т. М. Электронные умножители. М.: ГИТТЛ, 1998. Гл. 4, с. 100-130.
7. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Use of High-Field Electron Injection into Dielectrics to Enhance Functional Capabilities of Radiation MOS Sensors // Sensors. 2020. V.20. Is.8. pp.2382(1-11).
8. Andričević P., Náfrádi G., Kollár M., Náfrádi B., Lilley S., Kinane C., Frajtag P., Sienkiewicz A., Pautz A., Horváth E., Forró L. Hybrid halide perovskite neutron detectors // Advanced Functional Materials. 2021. Vol. 31, Issue 20, P. 2101234-2101242.
9. Воробьев А.П. Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений на арсениде галлия. М., 2005. Гл. 2, 4, с. 50-90, 130-170.
10. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Andreev D.V., Stolyarov A.A. Use of MIS Sensors of Radiation in High-Field Electron Injection Modes // Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences). 2020. Vol. 55. No. 2. P. 144-150.
11. Li Z., Chang S., Zhang H., Hu Y., Huang Y., Au L., Ren S. Flexible Lead-Free X-ray Detector from Metal-Organic Frameworks // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. Vol. 13, No. 15, P. 17705-17713.
12. Mahmoud K.G., Tashlykov O.L., Praveenkumar S., Sayyed M.I., Hashim S. Synthesis of a new epoxy resin reinforced by ZnO nanoparticles for  $\gamma$ -ray shielding purposes: Experimental and Monte Carlo simulation assessments // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 450, P. 131023.
13. Власов А.И., Милешин С.А., Цивинская Т.А., Шахнов В.А. Радиационная стойкость МЭМС-датчиков и методика ее оценки // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 4. С. 190-196.
14. Левин М.Н., Бондаренко Е.В., Бормонтов А.Е., Татаринцев А.В., Гитлин В.Р. Методика определения параметров радиационных дефектов и прогноза радиационной стойкости МОП-транзисторов // Письма в ЖТФ. - 2010. - Т. 36, вып. 15. - С. 02-06.
15. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М. Активный чувствительный элемент датчика радиационных излучений на основе МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими слоями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2010. С. 118-121.
16. Bordoni C., Ciavatti A., Cortinhal M., Pereira M., Cramer T., Barquinha P., Fraboni B. Dielectric multilayers impact on radiation-induced charge accumulation in highly sensitive oxide field effect transistors // APL Materials. - 2024. - 5 March.
17. Семенов С. В. Ионизирующие излучения в нашей жизни // Энергобезопасность и энергосбережение. 2009. №2.
18. Попов В. Пострадиационный эффект в ИС. Неразрушающий контроль качества ИС // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2002. - № 4. - С. 45-49.
19. Miller S.L., McLean F.B. A framework for understanding radiation-induced interface states in MOS devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987. Vol. 34, No. 6. P. 1343-1349.
20. Schrimpf R.D., Fleetwood D.M. Radiation Effects and Soft Errors in Integrated Circuits and Electronic Devices. - World Scientific, 2004. - 432 p.
21. Johnston A.N. Radiation effects in advanced microelectronics technologies // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. Vol. 45, No. 3. P. 1339-1354.

22. Fleetwood D.M. Total ionizing dose effects in MOS and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. Vol. 60, No. 3. P. 1706-1730.
23. Manzi G., Dalla Betta G.F., et al. Radiation effects in 65 nm CMOS transistors: A comparative study // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. Vol. 60, No. 6. P. 4123-4129.
24. Moreno C., et al. Radiation effects in SiC MOSFETs for space applications // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2016. Vol. 63, No. 4. P. 1978-1985.
25. Bordoni F., et al. Radiation effects in advanced CMOS technologies: A review // Microelectron. Reliab. 2018. Vol. 88-90. P. 1080-1085.
26. Brown G., et al. Modeling of radiation-induced charge trapping in high-k dielectrics // IEEE Trans. Device Mater. Reliab. 2012. Vol. 12, No. 3. P. 478-485.
27. Новиков А.В., Чандрашекхара М., Левин М.Н. и др. Моделирование радиационных эффектов в МОП-структурах с высоко-к диэлектриками // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 8. С. 1023-1030.
28. Ryzhov S., Kuznetsov V., Andreev V. Corner Simulation of CMOS Analog Integrated Circuit Taking into Account Radiation Influence // Micromachines. 2026. Vol.17. No.3. pp.300 (1-18).
29. Fleetwood D.M., Winokur P.S., et al. Effects of oxide traps, interface traps, and border traps on MOS devices // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73, No. 10. P. 5058-5074.
30. Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Dodd P.E., et al. Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. Vol. 55, No. 4. P. 2103-2111.
31. Oldham T.R., McLean F.B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. Vol. 50, No. 3. P. 483-499.
32. Holmes-Siedle A., Adams L. Handbook of Radiation Effects. 2nd ed. – Oxford University Press, 2002. – 480 p.
33. Левин М.Н., Татаринцев А.В., Бондаренко Е.В. и др. Радиационные эффекты в диэлектриках. – М.: Техносфера, 2018. – 368 с.
34. Структура металлоорганического каркаса МОК-5 [Электронный ресурс] // ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-synthesis-of-UiO-66-UiO-66-vac-and-UiO-66-ox-RT-stands-for-room\\_fig16\\_282908577](https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-synthesis-of-UiO-66-UiO-66-vac-and-UiO-66-ox-RT-stands-for-room_fig16_282908577).
35. Kuznetsov V.V., Andreev D.V., Andreev V.V., Piskunov S., Popov A.I. The Compact Model Synthesis for the RADFET Device // Technologies. 2025. Vol.13. pp.492 (1-18).

УДК 621.38.53

**Влазнева<sup>1</sup> Е.В., Гришин<sup>2</sup> Г.К., Долгова<sup>3</sup> В.В., Кузичкин<sup>4</sup> О.Р.**

<sup>1,2,3,4</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> oldolkuz@yandex.ru

### **МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ «МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК» ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНЫХ ДАТЧИКОВ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**Аннотация.** Рассмотрены методы модификации структур металл – диэлектрик – полупроводник для повышения чувствительности и эффективности датчиков радиационных излучений. Определена значимость улучшения структуры металл – диэлектрик – полупроводник. В связи с этим проведён анализ и выбор различных материалов для металлического, диэлектрического и полупроводникового слоёв, а также методов их нанесения. Разработана усовершенствованная структура металл – диэлектрик – полупроводник. Сформирован общий вывод по результатам моделирования и даны рекомендации разработчикам.

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, металл – диэлектрик – полупроводник (МДП), инжекция зарядов, потенциальный барьер, инверсионный слой, подвижность носителей, RADFET

**Vlazneva<sup>1</sup> E.V., Grishin<sup>2</sup> G.K., Dolgova<sup>3</sup> V.V., Kuzichkin<sup>4</sup> O.R.**

<sup>1,2,3,4</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> oldolkuz@yandex.ru

### **IMPROVEMENT OF THE METAL – DIELECTRIC – SEMICONDUCTOR STRUCTURE FOR THE DEVELOPMENT OF COMPACT RADIATION SENSORS**

**Abstract.** This article discusses various methods for modification the metal-dielectric-semiconductor structure to improve the sensitivity and efficiency of radiation sensors. The importance of improving the metal-dielectric-semiconductor structure was determined. In this regard, an analysis and selection of various materials for the metal, dielectric and semiconductor layers, as well as methods for their application, were carried out. An optimized metal-insulator-semiconductor structure was developed. A general conclusion was formed based on the simulation results, and recommendations for developers were given.

**Keywords:** ionizing radiation, metal – insulator – semiconductor, charge injection, potential barrier, inversion layer, carrier mobility, RADFET

Введение. Современные технологии требуют разработки высокочувствительных и компактных датчиков радиационных излучений для различных областей науки и техники, включая ядерную энергетику, медицину и космические исследования. Одним из ключевых аспектов повышения эффективности таких устройств является оптимизация структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), которая обеспечивает высокую чувствительность, стабильность и надежность работы датчика. В последние годы особое внимание уделяется созданию новых материалов и конфигураций, способных улучшить взаимодействие между слоями и повысить качество сигнала. В данной статье рассматриваются подходы к улучшению структуры МДП, направленные на разработку компактных и высокоэффективных датчиков радиационных излучений, что является важным шагом к их широкому внедрению в практические системы мониторинга и безопасности.

Датчики на основе металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) представляют собой одно из наиболее перспективных направлений. Эти устройства обладают свойствами, позволяющими повысить их чувствительность и селективность. Для достижения максимальной эффективности требуется улучшение всех компонентов структуры. Точная и эффективная технология мониторинга радиационных излучений способствует повышению уровня безопасности населения и защиты окружающей среды.

Методы и модели МДП-структур и принципы их работы

Устройство МДП-структуры вытекает из её названия и включает в себя несколько ключевых компонентов, которые изображены на рисунке 1.

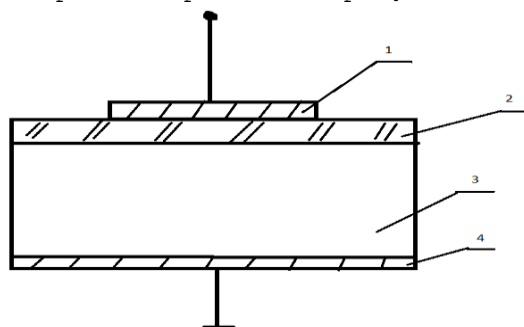


Рисунок 1 – МДП-структура

1-затвор, 2-подзатворный диэлектрик 3-полупроводниковая подложка,  
4-омический контакт

Структура представляет собой монокристаллическую полупроводниковую подложку, на одной из сторон которой сформирован диэлектрический слой (подзатворный диэлектрик). Поверх последнего формируется металлический электрод – затвор. На противоположной стороне полупроводниковой пластины создаётся омический контакт путём нанесения второго металлического электрода [1].

Процесс внедрения зарядовых частиц является одним из наиболее важных аспектов работы датчиков. Анализ механики инъекции и переноса зарядов позволит глубже понять их характеристики и улучшить технологические процессы, используемые при производстве этих устройств.

Когда к металлическому затвору подается напряжение (положительное для n-канальных и отрицательное для p-канальных транзисторов), создается электрическое поле между затвором и полупроводником, направленное от затвора к подзатворному слою полупроводника и способствующее притяжению электронов к границе диэлектрика [2].

При инъекции электроны, извлекаемые из металла, обладают значительной энергией благодаря приложенному электрическому полю. На границе металла и диэлектрика существует потенциальный барьер, который необходимо преодолеть для успешной инъекции электронов. Если энергия электрона превышает уровень вакуума, он может преодолеть этот барьер и внедриться в диэлектрик, в таком случае его называют «горячим» [3].

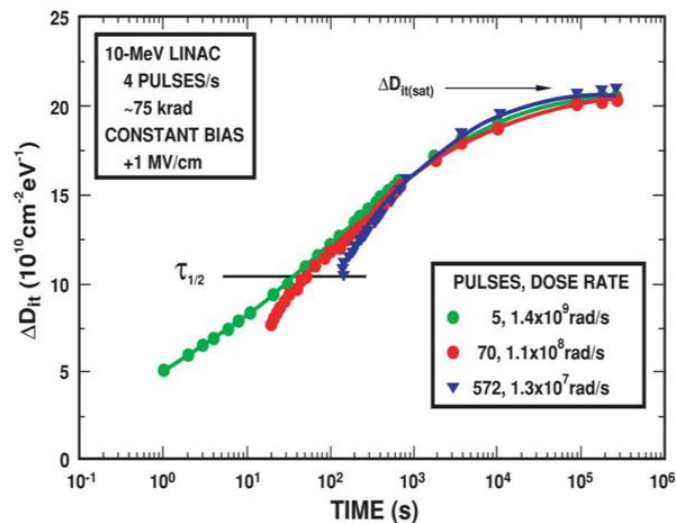


Рисунок 2 – Зависимость накопления заряда на дефектах (ловушках) границы раздела полупроводник-диэлектрик от времени, прошедшего после облучения [4]

Внутри диэлектрика могут находиться дефекты, такие как кислородные вакансии, которые образуют зарядовые ловушки. Когда электрон приближается к такой ловушке, его энергия может оказаться недостаточной для дальнейшего движения, что ведет к задержанию электрона в ловушке. Этот процесс приводит к снижению подвижности носителей заряда и накоплению заряда в диэлектрике [5].

Представленная на рисунке 2 зависимость отображает процесс накопления заряда на дефектах (ловушках) границы раздела полупроводник-диэлектрик, как функцию времени, прошедшего после облучения.

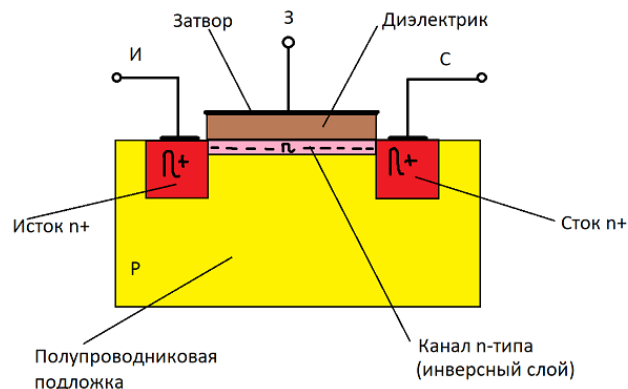


Рисунок 3. Конструкция активного чувствительного элемента детектора заряженных частиц на основе МДП-структуры

«Горячие» электроны постепенно теряют избыточную энергию через взаимодействие с решеткой диэлектрика, что приводит к термализации и возможному захвату на ловушках. Следовательно, не все электроны, достигшие диэлектрика, могут быть перенесены в полупроводник, поскольку часть из них может оказаться в ловушках.

На следующем этапе происходит переход инжектированных зарядов из диэлектрика в объем полупроводника. Аналогично границе раздела металл-диэлектрик, на межфазной границе диэлектрик-полупроводник также существуют потенциальные барьеры, преодоление которых является необходимым условием для протекания данного процесса. Для формирования инверсного слоя электроны, находящиеся в диэлектрике, должны обладать энергией, достаточной для их перехода в полупроводник.

При инжекции в n-канальный транзистор, конструкция которого представлена на рисунке 3, на границе раздела с полупроводником формируется инверсный слой, характеризующийся высокой концентрацией носителей заряда (электронов). Наличие данного инверсного слоя обеспечивает возможность управления проводимостью полупроводника и осуществления переключения между состояниями «открыто» и «закрыто».

Анализ существующих решений и их ограничений

В последние годы значительный интерес в области разработки устройств для измерения ионизирующего излучения вызывают технологии на основе RADFET (Radiation Field Effect Transistor – полевой транзистор, чувствительный к радиации). RADFET представляет собой компактный и высокочувствительный инструмент, позволяющий регистрировать накопленные дозы облучения, что обуславливает его перспективность для применения в различных областях [6].

Данное исследование посвящено рассмотрению существующих методов усовершенствования МДП-структур, применяемых в датчиках радиации. Для анализа имеющихся решений и разработки путей их улучшения в качестве эталонной структуры был выбран RADFET.

RADFET является полевым транзистором, построенным на принципе накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике, расположенном под затвором транзистора. Основные этапы работы RADFET включают генерацию электронно-дырочных пар (e-h пар) в диэлектрике при взаимодействии с ионизирующим излучением, что приводит к созданию свободных электронов и дырок [6].

Под действием электрического поля, сформированного смещением на затворе, электроны движутся к затвору, а дырки – к подложке, где они могут быть захвачены ловушками в диэлектрике ( $E'$ ). Это приводит к накоплению положительного заряда под затворами образованию интерфейсного дефекта (ПС) на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub>.

Они представляют собой обрыв связи кремния на границе раздела и являются амфотерными ловушками, способными захватывать как электроны, так и дырки.

Дополнительным фактором, влияющим на распределение заряда, является транспорт протонов ( $H^+$ ), которые могут образовываться в диэлектрике и мигрировать к границе раздела Si/SiO<sub>2</sub>.

Этот процесс представлен на рисунке 4. Увеличение накопленного заряда восстанавливает пороговое напряжение ( $V_T$ ), необходимое для формирования инверсионного канала между истоком и стоком транзистора. Это изменение может быть измерено и использовано для определения дозы радиации [7].



Рисунок 4. Зонная диаграмма МДП-структуры, иллюстрирующая основные зарядовые процессы, протекающие в ней при воздействии радиационного излучения при положительном потенциале на затворе [8]

В отличие от традиционных методов измерения радиации, таких как ионизационные дозиметры и сцинтиляционные детекторы, RADFET обладает рядом преимуществ, включая компактность, высокую чувствительность и долговечность. Малые размеры и легкость конструкции позволяют интегрировать RADFET в различные системы, а высокая чувствительность к ионизирующему излучению делает его эффективным инструментом для мониторинга радиационной безопасности. Благодаря своей конструкции и способности работать в жестких условиях, RADFET также демонстрирует долговечность и стабильность в эксплуатации[9].

При анализе существующих решений в области усовершенствования датчиков радиационных излучений, включая RADFET, можно выделить несколько ключевых ограничений:

Со временем характеристики датчиков могут изменяться, что вызывает снижение точности измерений. Этот эффект может быть связан с термическими воздействиями, радиацией и другими факторами окружающей среды. Необходим регулярный мониторинг состояния датчиков и возможность их замены для поддержания эффективной работы.

Датчики могут демонстрировать изменяющиеся характеристики в зависимости от температуры, что усложняет их эксплуатацию в условиях с высокими или низкими температурами. Разработка термостойких материалов и технологий может помочь в решении данной проблемы.

Размеры и свойства материалов, использованных в конструкции датчиков, могут значительно влиять на точность накопления заряда и последующие измерения. Улучшение технологий производства и контроль качества могут способствовать повышению точности.

Для обеспечения точности и надежности измерений необходимо проводить регулярную калибровку датчиков. Это требует дополнительных ресурсов и может усложняться в полевых условиях[10].

В рамках дальнейшего анализа существующих решений для датчиков радиационного излучения стоит обратить внимание на конструкции, использующие многослойные диэлектрические структуры с чередующимися слоями. Такие МДП-структуры предполагают расположение внутри одной системы нескольких слоёв диэлектриков с различными свойствами, расположенных один за другим. Это позволяет управлять распределением электрического поля и эффективнее захватывать радиационно-индуцированные заряды [11].

Идея заключается в создании многослойных диэлектрических систем, где слои с высокой диэлектрической проницаемостью чередуются с слоями с низкой диэлектрической проницаемостью. Такая модель обеспечивает более устойчивое и контролируемое накопление зарядов под воздействием ионизирующего излучения, а также способствует повышению стабильности измерений.

Преимущество данной конструкции заключается в возможности точной настройки электрических и зарядовых свойств структуры за счёт выбора материалов и толщины каждого слоя. Это позволяет оптимизировать чувствительность датчика, повысить его стабильность и уменьшить влияние температурных и других внешних факторов.

При сравнении с классическими однородными МДП-структурами, многослойные диэлектрические системы с чередующимися слоями обладают потенциалом значительно повысить чувствительность и стабильность радиационных датчиков, особенно в условиях воздействия сложных радиационных полей. Для достижения оптимальных характеристик необходимо определить ключевые параметры каждого слоя.

Анализ и обоснование выбора материалов

3.1 Сравнение электрических свойств различных материалов для металлических, диэлектрических и полупроводниковых слоев, обоснование выбора нужных материалов.

Выбор подходящих материалов для каждого слоя структуры значительно влияет на производительность, энергоэффективность и устойчивость устройств к внешним воздействиям. Особое внимание уделяется сравнительному анализу электрических свойств различных металлических, диэлектрических и полупроводниковых материалов для использования в МДП-структурах, их преимущества и недостатки, что способствует улучшению проектирования современных электронных устройств.

Металлы, используемые в МДП, должны обеспечивать высокую электрическую проводимость и антикоррозийную стойкость. В качестве металлических слоев в МДП-структурах могут использоваться различные материалы, среди которых выделяются золото (Au), алюминий (Al), медь (Cu) и серебро (Ag). Сравнительные характеристики этих материалов представлены в табл.1.

Золото, обладая хорошей проводимостью, устойчиво к окислению и обеспечивает надежное соединение, но его высокая стоимость ограничивает применение в массовых



устройствах. Алюминий уступает золоту по проводимости, менее устойчив к коррозии, что требует защиты от окислительных процессов. Он часто используется из-за своей низкой стоимости и легкости обработки, это делает его экономически выгодным решением. Медь является проводником с высокой проводимостью. Из-за склонности к коррозии требует дополнительных мер по её защите и может негативно сказаться на стабильности электрических характеристик. Серебро обладает наивысшей электропроводимостью среди всех металлов, но также имеет высокую стоимость и подвергается окислению, что ограничивает его использование.

Таблица 1

Сравнительный анализ характеристик различных металлов для затвора [12]

| Металл   | Проводимость (См/м)  | Коррозия | Стоимость | Обработка | Применение                        |
|----------|----------------------|----------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| Золото   | 45,5*10 <sup>6</sup> | Высокая  | Высокая   | Сложная   | Ограничено в массовых устройствах |
| Алюминий | 37*10 <sup>6</sup>   | Низкая   | Низкая    | Легкая    | Экономически выгодное решение     |
| Медь     | 58,1*10 <sup>6</sup> | Низкая   | Средняя   | Средняя   | Требуется защиты от коррозии      |
| Серебро  | 62,5*10 <sup>6</sup> | Низкая   | Высокая   | Средняя   | Ограничено из-за окисления        |

Исходя из сравнительного анализа характеристик золота, алюминия, меди и серебра, представленного в таблице 1, алюминий был выбран в качестве основного металлического материала для МДП-структуры по нескольким причинам. Во-первых, он обладает достаточной электрической проводимостью, что позволяет эффективно передавать электрические сигналы. Во-вторых, алюминий является экономически выгодным решением, так как его стоимость значительно ниже по сравнению с другими металлами, такими как золото и серебро. Кроме того, он легок в обработке и легко формируется в необходимые геометрические формы. Несмотря на то, что алюминий менее устойчив к коррозии, чем золото, его применяют с покрытиями, защищающими от окислительных процессов [13].

Диэлектрические материалы должны обеспечивать высокую степень изоляции и механическую прочность. Среди наиболее подходящих материалов для диэлектрического слоя МДП-структуры выделяют диоксид кремния (SiO<sub>2</sub>) и оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а также перовскиты. Их сравнительные характеристики продемонстрированы в табл.2.

Таблица 2

Сравнительный анализ характеристик материалов для подзатворного диэлектрика [15]

| Материал        | Диэлектрическая прочность | Диэлектрическая проницаемость | Миниатюризация | Надежность | Стоимость | Граница раздела с Si |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|------------|-----------|----------------------|
| Диоксид кремния | Высокая                   | Низкая                        | Ограничена     | Высокая    | Низкая    | Высокая              |
| Оксид алюминия  | Высокая                   | Высокая                       | Хорошая        | Высокая    | Средняя   | Средняя              |
| Перовскиты      | Средняя                   | Высокая                       | Хорошая        | Низкая     | Высокая   | Низкая               |

Диоксид кремния является фундаментальным диэлектриком, известным своей высокой диэлектрической прочностью и химической стабильностью. Одним из его главных преимуществ является возможность формирования качественной границы раздела с кремнием, что достигается методом термического окисления. Эта граница раздела характеризуется низкой плотностью поверхностных состояний, что критически важно для обеспечения высокой подвижности носителей заряда в канале полевых транзисторов. Это, в свою очередь, напрямую влияет на производительность устройств [14].



Однако низкая диэлектрическая проницаемость диоксида кремния ставит ограничения на миниатюризацию. Для поддержания необходимой емкости в затворах транзисторов требуется уменьшение толщины диэлектрика, что приводит к увеличению туннельного тока, снижению надежности и росту энергопотребления. Это создает необходимость поиска альтернативных материалов с более высокой диэлектрической проницаемостью [16].

Оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) представляет собой перспективный диэлектрический материал, характеризующийся высокой диэлектрической проницаемостью. Данное свойство позволяет уменьшить геометрические размеры транзисторов и повысить плотность интеграции в современных датчиках.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , обладая высокой диэлектрической прочностью и химической стабильностью, также способствует улучшению надежности и долговечности электронных компонентов.

Перовскиты представляют собой класс материалов с уникальной кристаллической структурой, однако несмотря на их высокую эффективность преобразования и гибкость в синтезе, они имеют серьезные ограничения в использовании. Одним из основных недостатков является нестабильность: перовскиты, подвержены деградации под воздействием влаги и тепла, что снижает их долговечность. Кроме того, технологии формирования перовскитовых пленок могут быть сложными и дорогими, а качество границ раздела с кремнием часто вызывает проблемы, приводя к снижению подвижности носителей заряда. Наконец, опасность токсичных компонентов в некоторых перовскитах также ограничивает их применение.

Как видно из таблицы 2, оксид алюминия обладает наилучшими электрическими характеристиками, включая высокую диэлектрическую проницаемость и диэлектрическую прочность, и поэтому был выбран в качестве основного диэлектрического материала. Эти свойства позволяют уменьшить геометрические размеры транзисторов и повысить плотность интеграции, что особенно актуально в современных датчиках.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  также демонстрирует отличные сцепляющие свойства с кремнием и другими полупроводниковыми материалами, что ведет к улучшению качества границы раздела и общей стабильности работы устройств. Высокая стойкость к окислению и химическим воздействиям делает его долговечным выбором [17].

Полупроводниковый слой в металлдиэлектрических полевых (МДП) структурах должен обладать параметрами, которые обеспечат его эффективную работу. К ключевым характеристикам относятся высокая подвижность носителей заряда, низкий уровень примесей, широкий энергетический зазор, стабильность при изменении эксплуатационных условий и хорошая совместимость с другими материалами. Эти свойства обеспечивают быстрое переключение, минимизацию утечек тока и надежность устройства. Основными материалами для полупроводниковых слоев являются кремний (Si), арсенид галлия (GaAs), германий (Ge) и фосфид индия (InP), сравнительный анализ характеристик которых представлен в таблице 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ характеристик материалов для полупроводникового слоя [18]

| Материал | Подвижность электронов ( $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ) | Ширина запрещенной зоны (эВ) | Стоимость |
|----------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|
| Si       | ~1400                                                          | 1.12                         | Низкая    |
| GaAs     | ~8500                                                          | 1.42                         | Высокая   |
| Ge       | ~3900                                                          | 0.67                         | Средняя   |
| InP      | ~4000                                                          | 1.35                         | Высокая   |

Кремний (Si) занимает ведущую позицию среди полупроводниковых материалов, благодаря своей доступности и экономичности. Он является одним из самых распространенных элементов, что делает его недорогим и доступным для массового производства. Кремний устойчив в широком диапазоне температур и демонстрирует высокое качество интерфейса Si/SiO<sub>2</sub>, что критично для работы МДП-транзисторов. Несмотря на все эти преимущества, кремний обладает ограниченной подвижностью носителей (около 1400  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ), что может снижать производительность высокоскоростных устройств [19].

Арсенид галлия (GaAs) имеет высокую подвижность носителей, достигающую 8500  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , что позволяет создавать более быстрые транзисторы и использовать данный материал в высокочастотных устройствах. Его широкая запрещенная зона (1.42 эВ)

обеспечивает низкий уровень тепловых шумов и работу в более широком диапазоне температур. Однако высокая стоимость, сложность производства и хрупкость ограничивают его массовое применение [19].

Германий (Ge) обладает сравнительно высокой подвижностью носителей около  $3900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Тем не менее, его устойчивость к высоким температурам и химическим воздействиям ниже, чем у кремния, а малая ширина запрещенной зоны ( $0.67 \text{ эВ}$ ) делает его менее подходящим для высокотемпературных условий [20].

Фосфид индия (InP) выделяется своей высокой подвижностью (около  $4000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ) и отличными оптическими свойствами, однако, как и в случае с GaAs, высокая стоимость и сложность производства ограничивают его применение.

Несмотря на существование перспективных альтернатив, кремний (Si) продолжает оставаться наиболее подходящим материалом для массового производства МДП-транзисторов благодаря оптимальному сочетанию доступности, развитой технологической базы и приемлемых характеристик. Преимуществом кремния является возможность формирования высококачественной границы раздела с диэлектриком ( $\text{SiO}_2$ ), что обеспечивает низкую плотность поверхностных состояний.

Таким образом, для каждого слоя МДП-структуры были выбраны оптимальные материалы: алюминий в качестве металла – благодаря экономичности и доступности, оксид алюминия в качестве диэлектрика – за счет высоких электрических характеристик, и кремний в качестве полупроводникового слоя – благодаря надежности и хорошо отработанной технологии производства. Данные материалы обеспечивают необходимую производимость и стабильность.

### 3.2 Методы нанесения материалов

Для изготовления МДП-структур применяются современные технологии нанесения материалов, позволяющие достичь необходимой однородности и функциональности слоев. В качестве методов формирования металлического слоя рекомендуется использовать магнетронное напыление и термическое испарение алюминия в вакууме. Магнетронное напыление основано на генерации плазмы для ионизации рабочего газа, что обеспечивает эффективную распыление мишени, равномерное покрытие и минимизацию дефектов на межфазной границе, тем самым улучшая электрические характеристики структуры. Физическое испарение в вакууме, в свою очередь, позволяет точно контролировать толщину осаждаемого слоя и снижать уровень загрязнений.

Для диэлектрических слоев, например из оксида алюминия, эффективны магнетронное напыление и химическое осаждение из паровой фазы (CVD – Chemical Vapor Deposition). Магнетронное напыление гарантирует контроль качества покрытия, тогда как CVD позволяет достичь высокой однородности и стабильности тонких пленок, что критически важно для производительности МДП-структур [21].

Кремний в качестве полупроводникового слоя обычно наносится с использованием метода CVD, который обеспечивает высокую чистоту и однородность слоя. Молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE – Molecular Beam Epitaxy) также может быть применена для создания легированных слоев, обеспечивая контроль на атомном уровне и улучшая характеристики устройств.

Таким образом, выбранные методы нанесения алюминиевых, диэлектрических и кремниевых слоев гарантируют их высокое качество и стабильность, что необходимо для эффективной работы современных МДП-структур [22].

#### Архитектура усовершенствованной структуры

Наибольший интерес с точки зрения усовершенствования МДП-структуры представляет подзатворная область, где металлический затвор из высокопроводящего материала (например, алюминия) располагается на верхнем уровне и обеспечивает управление электрическими полями и необходимую проводимость устройства. Архитектура усовершенствованной МДП-структуры приведена на рисунке 5.

Далее целесообразно разместить сочетание нескольких тонкопленочных подзатворных диэлектрических материалов, как это показано в работах [23, 24]. Например, под металлическим затвором наносится диэлектрический слой из оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) толщиной от 5 до 50 нм. Выбор такой толщины обусловлен высокой диэлектрической проницаемостью данного материала, что позволяет эффективно минимизировать токи утечки, особенно в современных высокопроизводительных устройствах. В то же время чрезмерное увеличение толщины может приводить к возникновению нежелательных эффектов, таких как рост времени переключения.

Дополнительный диэлектрический слой из диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), показанный на рисунке 5 и расположенный под слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , улучшает механическую прочность и стабилизирует электрические свойства устройства. Толщина этого слоя составляет от 10 до 50 нанометров, так как он должен быть не слишком толстым, чтобы не ухудшать диэлектрические свойства всей конструкции, но и не слишком тонким для обеспечения прочности и устойчивости.

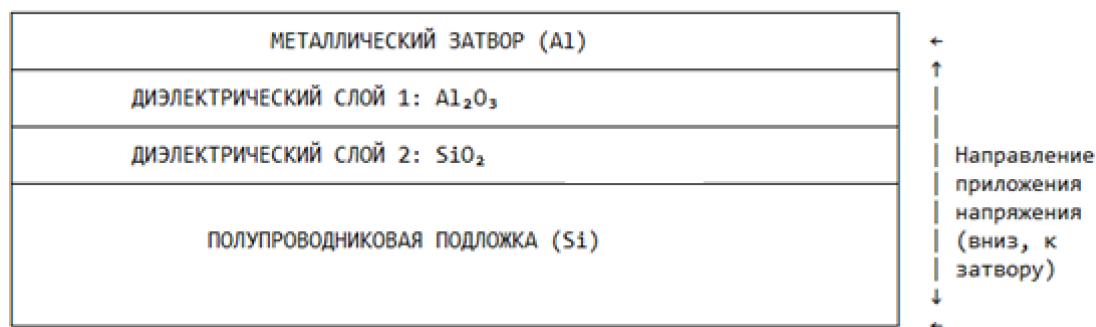


Рисунок 5. Архитектура усовершенствованной МДП-структуры

Выбор чередования слоев диэлектриков  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  обусловлен их уникальными свойствами:  $Al_2O_3$  обеспечивает высокую диэлектрическую проницаемость и снижает токи утечки, в то время как  $SiO_2$  добавляет механическую прочность и стабилизирует электрические характеристики. Такое сочетание материалов позволяет создать надежную и высокоэффективную многослойную структуру, что согласуется с данными других исследований, где теоретический анализ и численное моделирование демонстрируют значительное улучшение электрических характеристик в аналогичных слоистых системах, включая снижение токов утечки и увеличение сопротивления пробою [23, 24].

Полупроводниковый слой из кремния (Si) расположен на нижнем уровне структуры и формирует её активную область. Толщина слоя составляет 200–500 мкм, обеспечивая эффективное управление зарядом и высокую подвижность носителей. Выбранный диапазон поддерживает баланс между производительностью и механической прочностью, предотвращая разрушение при эксплуатации.

Эта структура с четкой интеграцией слоев создает сложный барьер, который улучшает электрические характеристики устройства и защищает его от внешних воздействий. Проектирование многоуровневой конструкции, включающей чередующиеся слои  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ , направлено на улучшение электрических характеристик и защиту устройства от внешних факторов. Использование ионного травления позволяет контролировать толщину и морфологию слоев, что способствует снижению дефектов и улучшению качества конечного изделия.

Преимущества и недостатки усовершенствованной структуры по сравнению с традиционными решениями. Возможные направления для будущих исследований и рекомендации для разработчиков

Сравнительный анализ усовершенствованной архитектуры МДП-структуры и традиционного решения, такого как RADFET (Radiation Field Effect Transistor), выявляет ключевые различия в их конструктивных элементах, производительности и областях применения. RADFET основан на принципе накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике, расположенном под затвором. При взаимодействии с ионизирующим излучением в этом диэлектрике образуются электронно-дырочные пары, что в свою очередь приводит к изменению порогового напряжения. Это изменение и служит основой для измерения дозы радиации.

В отличие от RADFET, такая МДП-структура использует многослойную конфигурацию, в которой желаемые электрические характеристики достигаются за счет интеграции различных диэлектриков, таких как оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) и диоксид кремния ( $SiO_2$ ). Это сочетание обеспечивает высокую диэлектрическую проницаемость и механическую прочность, что укрепляет общую надежность и долговечность устройства. Улучшенная МДП-структура предлагает высокую чувствительность и точность, поскольку оксид алюминия позволяет уменьшить размеры транзисторов и повысить плотность интеграции, в то время как устойчивость к внешним воздействиям делает их более надежными в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, усовершенствованная МДП-структура и RADFET представляют собой два различных подхода к разработке радиационных датчиков, каждый из которых имеет свои уникальные преимущества и ограничения. МДП-структуры выделяются высокой производительностью и надежностью, что делает их привлекательными для применения в современных технологиях, в то время как традиционные RADFET-датчики остаются важным инструментом благодаря своей простоте и уже сложившимся процессам производства. Выбор между этими подходами зависит от специфических требований, которые предъявляются к характеристикам и условиям эксплуатации в каждой конкретной области применения.

Разработчики могут ориентироваться на применение RADFET-датчиков в областях, требующих высокой чувствительности в условиях радиационного фона, таких как

космические миссии и медицинские учреждения. Компактные устройства на основе усовершенствованной МДП-структуры подойдут для мобильного и портативного использования, а многослойные структуры обеспечат необходимую надежность в условиях длительного использования. Эти рекомендации помогут эффективно выбирать и улучшить радиационные датчики, повышая их надежность и функциональность, что в конечном итоге обеспечит более высокий уровень радиационной безопасности.

**Заключение.** В ходе проведенного исследования было установлено, что модификация структуры металл-диэлектрик-полупроводник способствует значительному повышению чувствительности и селективности датчиков радиационных излучений. Использование современных материалов с улучшенными электропроводными и диэлектрическими свойствами позволило снизить уровень шумов и повысить стабильность работы устройства в широком диапазоне условий эксплуатации. Анализ полученных данных продемонстрировал, что модификация архитектуры путем изменения толщин слоёв и их последовательности способствует увеличению коэффициента усиления и снижению пороговых значений обнаружения радиации. Эти результаты подтверждают перспективность предложенного подхода для создания компактных, энергоэффективных и высокоточных датчиков, что особенно актуально для применения в области ядерной медицины, космических технологий и экологического мониторинга. В дальнейшем необходимо провести дополнительные исследования по повышению долговечности структур и их адаптации к экстремальным условиям окружающей среды, а также разработать прототипы для практических испытаний в условиях реальных эксплуатационных сред.

**Благодарности:** Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSFN-2024-0086.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб. Пособие//ПетрГУ. 2004. С.91.
2. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Andreev D.V., Stolyarov A.A. Use of MIS Sensors of Radiation in High-Field Electron Injection Modes // Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences). 2020. Vol. 55. No. 2. pp. 144-150.
3. Kamocsai R.L., Porod W. Hot electrons and traps in a-SiO<sub>2</sub> // Solid-State Electronics. 1989. Vol. 32. № 12. pp.1825-1829.
4. Radiation Effects in MOS Oxides / J.R. Schwank [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. Vol. 55. No. 4. pp. 1836.
5. Fleetwood D.M., Winokur P.S., Schwank J.R. Using laboratory X-ray and Co60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1988. Vol. 35. No. 6. pp. 1497-1505.
6. Kuznetsov V.V, Andreev D.V., Andreev V.V., Piskunov S., Popov A.I. The Compact Model Synthesis for the RADFET Device // Technologies. 2025. Vol.13. P.492(1-18).
7. Перевертайло В.Л. Датчики интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010. № 5-6. С. 22-29.
8. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Use of High-Field Electron Injection into Dielectrics to Enhance Functional Capabilities of Radiation MOS Sensors // Sensors. 2020. V.20. Is.8. P.2382(1-11).
9. Перевертайло В.Л. Датчики интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010. № 5-6. С. 20-21.
10. Holmes-Siedle A., Adams L. RADFET: A review of the metal-oxide-silicon devices as dosimeters use of integrating // Radiat. Phys. Chem. 1986. Vol. 28. No. 2. P. 235-244.
11. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М. Активный чувствительный элемент сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими слоями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение" 2010. С.118-119.
12. Смирятин А.П., Смирятин Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. 3-е изд., доп. и перераб. - М., Металлургия, 1974 г. 401 с.
13. Атигаев А.С. Барьерные пленки оксида алюминия, как диэлектрики// Международный студенческий научный вестник. 2018. № 2.С.17.
14. Сканапи Г. И. Физика диэлектриков. Область слабых полей. - М.: Техничко-техническая литература, 1949. 500 с.
15. Горячие электроны в оксиде кремния // УФН. 2017. Т. 187. № .9. С. 971-979.
16. Ахметов Н. С. Общая и неорганическая химия: учебник для вузов - 14-е изд., стер - М.: Высш. шк. 2025.567 с.
17. Смирятин А.П., Смирятин Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. 3-е изд., доп. и перераб. - М.: Металлургия, 1974 г. 407 с.
18. Глинка Н.Л. Общая химия. 12-е издание М.-Л. Химия. 1965г. 503 с.
19. Н. Н. Герасименко и Ю. Н. Пархоменко // «Кремний – материал нанoeлектроники». 2007. С.148.
20. Тананаев И. В., Шпирт М. Я. Химия германия. - М.: Химия. 1968. 451 с.
21. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления - Киев: Аверс, 2008. 105 с.
22. Ryzhov S., Kuznetsov V., Andreev V. Corner Simulation of CMOS Analog Integrated Circuit Taking into Account Radiation Influence // Micromachines. 2026. Vol.17. No.3.P.300(1-18).
23. Peacock, P. W., & Robertson, J. (2002). Band offsets and Schottky barrier heights of high dielectric constant oxides // Journal of Applied Physics. 92(8).pp.4712-4721.
24. Wilk G. D., Wallace R. M., Anthony J. M. High-k gate dielectrics: Current status and materials properties considerations // Journal of Applied Physics.2001. 89(10). pp.5243-5275.

УДК 621.387

**Базарова<sup>1</sup> М.Д., Жалнин<sup>2</sup> В.П., Крыгин<sup>3</sup> М.С., Кузичкин<sup>4</sup> О.Р.**

<sup>1,2,3,4</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> zhalnin@mail.ru

### **ОБЗОР СТРУКТУР ДАТЧИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**Аннотация.** Развитие портативных систем радиационного мониторинга для атомной энергетики, космических миссий и медицинской дозиметрии требует перехода к миниатюрным твердотельным сенсорам, среди которых металл-диэлектрик-полупроводниковые (МДП) структуры занимают особое положение благодаря совместимости с планарной технологией микроэлектроники. В работе проведен систематический анализ современных материаловедческих и конструктивных решений в области компактных МДП-датчиков ионизирующих излучений, включая применение высокопроницаемых диэлектриков ( $\text{HfO}_2$ , оксидов редкоземельных элементов), многослойных структур типа металл-нитрид-оксид-полупроводник, платформы «кремний на изоляторе» и широкозонных полупроводников. Рассмотрены физические механизмы детектирования, основанные на накоплении радиационно-индуцированного заряда в диэлектрическом слое и результирующем сдвиге порогового напряжения транзистора; проанализированы характеристики RADFET-сенсоров с различными конфигурациями подзатворного диэлектрика, микроструктурированных нейтронных детекторов и коммерческих МОП-транзисторов, адаптированных для дозиметрии.

**Ключевые слова:** металл – диэлектрик – полупроводник, радиационные детекторы, RADFET, высокопроницаемые диэлектрики, кремний на изоляторе, карбид кремния, компактная дозиметрия

**Bazarova<sup>1</sup> M.D., Zhalnin<sup>2</sup> V.P., Krygin<sup>3</sup> M.S., Kuzichkin<sup>4</sup> O.R.**

<sup>1,2,3,4</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> zhalnin@mail.ru

### **REVIEW OF IONIZING RADIATION SENSORS STRUCTURES**

**Abstract.** The development of portable radiation monitoring systems for nuclear power, space missions, and medical dosimetry requires a transition to miniature solid-state sensors, among which metal-dielectric-semiconductor (MDP) structures occupy a special position due to compatibility with planar microelectronics technology. The paper provides a systematic analysis of modern materials science and design solutions in the field of compact MRI ionizing radiation sensors, including the use of highly permeable dielectrics ( $\text{HfO}_2$ , rare earth element oxides), multilayer structures such as metal-nitride-oxide-semiconductor, silicon-on-insulator platforms and wide-band semiconductors. The physical detection mechanisms based on the accumulation of radiation-induced charge in the dielectric layer and the resulting shift in the transistor threshold voltage are considered, and the characteristics of RADFET sensors with various gate dielectric configurations, microstructured neutron detectors, and commercial MOSFETs adapted for dosimetry are analyzed.

**Keywords:** metal-dielectric-semiconductor, radiation detectors, RADFET, highly permeable dielectrics, silicon-on-insulator, silicon carbide, compact dosimetry

#### **Введение**

Контроль ионизирующих излучений, как известно, составляет неотъемлемую часть обеспечения безопасности в атомной энергетике, космических исследованиях, медицинской диагностике и радиотерапии: к примеру, определение радиационных потоков требуется при эксплуатации ядерных реакторов, мониторинге радиационной обстановки на производственных объектах, проведении лучевой терапии онкологических заболеваний, а также при длительных космических миссиях, где экипаж подвергается воздействию галактических космических лучей и солнечных протонных событий. Наиболее часто применяемые системы детектирования основаны на датчиках ионизирующего излучения (ДИИ). Например, ДИИ на газонаполненных счетчиках Гейгера-Мюллера или пропорциональных камерах с  $^3\text{He}$ , обладают, как показано в исследованиях, достаточной чувствительностью и надежностью [1], однако их массогабаритные параметры, требования к источникам питания и необходимость периодической калибровки ограничивают применение в условиях, где необходима компактность, автономность и возможность непрерывного мониторинга. Развитие микроэлектронных технологий и появление новых полупроводниковых материалов открыли перспективы создания миниатюрных датчиков, интегрируемых в портативные измерительные комплексы и даже носимые устройства персональной дозиметрии. В частности, речь о металл-диэлектрик-полупроводниковые структуры (далее – МДП-структуры), которые привлекают внимание исследователей благодаря совместимости с планарной технологией микроэлектроники, возможности интеграции с обрабатывающей электроникой на одном кристалле, а также «чувствительности» к накоплению радиационно-индуцированного заряда в диэлектрическом слое. Данный принцип обеспечивает возможность создания интегральных дозиметров миллиметровых размеров с низким энергопотреблением и совместимостью со стандартными технологическими процессами производства интегральных схем [2].

Несмотря на значительный объем публикаций, посвященных отдельным аспектам применения МДП-структур в радиационной сенсорике, систематический анализ инновационных решений в создании компактных детекторов, охватывающий материаловед-

ческие, конструктивные и технологические подходы последнего десятилетия, представлен фрагментарно. Патентная активность в области микроструктурированных нейтронных детекторов, разработка RADFET-сенсоров (RADFET – RADiation sensitive Field-Effect Transistor (радиационно-чувствительный полевой транзистор)) с многослойными диэлектриками и коммерциализация детекторов на основе карбида кремния и нитрида бора требуют обобщения накопленного опыта и выявления перспективных направлений дальнейших исследований – это определяет новизну исследования, которая состоит в системном анализе новых подходов, тенденций и практик в сфере разработки и применения компактных датчиков радиационных излучений на основе металл-диэлектрик-полупроводниковых структур.

Целью исследования выступает обзор современных направлений в разработке компактных датчиков ионизирующего излучения на основе металл-диэлектрик-полупроводниковых структур, определение ключевых инноваций и оценка перспектив их применения.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

провести обзор физических принципов функционирования мдп-структур в качестве сенсоров радиационного излучения и проанализировать влияние параметров диэлектрического слоя на чувствительность детектора;

систематизировать сведения о современных диэлектрических материалах, применяемых в мдп-структурах, включая высокопроницаемые диэлектрики и оксиды редкоземельных элементов;

рассмотреть технологические подходы к миниатюризации и интеграции мдп-датчиков (в том числе микроструктурирование, использование широкозонных полупроводников и др.);

проанализировать эффективность и радиационную стойкость разработанных решений на основе опубликованных экспериментальных данных и патентных материалов;

обобщить примеры практического применения компактных детекторов на основе мдп-структур и выявить потенциальные области внедрения.

Объектом исследования выступают компактные датчики ионизирующего излучения на основе полупроводниковых структур.

Предметом исследования являются инновационные технологии и материалы, применяемые в металл-диэлектрик-полупроводниковых структурах для создания радиационных сенсоров.

#### 1. Анализ методов и моделей функционирования ДИИ

Широкое распространение получили ДИИ на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник. Конструктивно МДП-структура состоит из монокристаллической полупроводниковой пластины (подложки), на планарную сторону которой нанесен слой диэлектрика, покрытый металлическим электродом-затвором [3, 4]. На противоположную сторону подложки наносится омический контакт, обеспечивающий электрическое соединение с полупроводником (рисунок 1). Подобная конфигурация позволяет управлять электрическими характеристиками приборов посредством изменения напряжения на затворе, что определяет их функциональность в качестве активных элементов электронных схем [4].

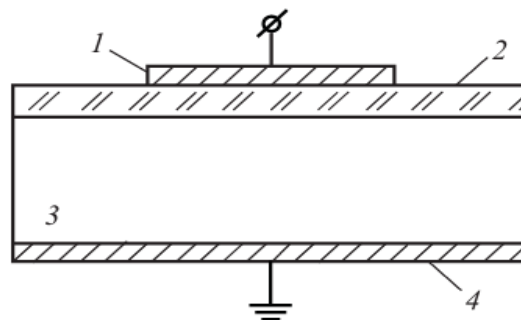


Рисунок 1 – Устройство МДП-структуры 1 – затвор, 2 – подзатворный диэлектрик, 3 – полупроводниковая подложка, 4 – омический контакт [4]

Граница раздела «полупроводник-диэлектрик» представляет наиболее чувствительную область структуры к внешним воздействиям, что находит применение в сенсорных технологиях. Воздействие ионизирующего излучения на диэлектрический слой МДП-структуры приводит к образованию электронно-дырочных пар, часть которых рекомбинирует, тогда как оставшиеся носители заряда перемещаются под действием электрического поля и захватываются на ловушки в объеме диэлектрика и на границе раздела с полупроводником [5]. Накопление положительного заряда захваченных дырок вызывает измеримый сдвиг порогового напряжения транзистора, величина которого пропорциональна поглощенной дозе излучения [6]. Данный механизм

формирует физическую основу применения МДП-структур при оценке ионизирующих излучений.

Тонкопленочные датчики на основе МДП-структур характеризуются рядом параметров, определяющих их практическую применимость. Типовая конструкция включает металлический электрод толщиной 10–70 нм, нанесенный на диэлектрический слой толщиной 30–200 нм, расположенный на высокоомном полупроводнике [2]. Геометрические размеры структуры напрямую влияют на чувствительность и диапазон измеряемых доз. Сравнительный анализ характеристик МДП-сенсоров с традиционными полупроводниковыми детекторами, проведенный в академическом дискурсе, позволяет говорить о следующих преимуществах:

пониженный энергетический порог регистрируемых частиц (единицы килоэлектрон-вольт), обусловленный уменьшенной толщиной мертвой зоны, что расширяет спектр детектируемых излучений;

минимальный темновой ток, ограничиваемый преимущественно параметрами измерительной аппаратуры, а не свойствами детектора;

возможность размещения исследуемого объекта непосредственно в качестве верхнего электрода, что практически исключает мертвую зону и повышает эффективность детектирования;

невысокая стоимость производства и способность функционирования при атмосферном давлении без необходимости создания вакуума [2].

Применение МДП-структур в ДИИ сталкивается с определенными ограничениями. Традиционно используемый в качестве диэлектрика термически выращенный оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) обладает рядом недостатков, препятствующих дальнейшему совершенствованию датчиков. Так, проникаемость  $\text{SiO}_2$  для ионов щелочных металлов приводит к возникновению нежелательных ионных токов, ухудшающих стабильность параметров устройства. Высокая концентрация микропор, локальных механических напряжений и точечных дефектов на границе раздела оксид-подложка формирует значительные внутренние электрические поля, ограничивающие максимальную толщину слоя  $\text{SiO}_2$  величиной 65–70 нм [7]. Также относительно низкая диэлектрическая проникаемость оксида кремния ( $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3,9$ ) снижает крутизну передаточных характеристик МОП-транзисторов, что негативно сказывается на их быстродействии и энергоэффективности.

Поиск альтернативных диэлектрических материалов, совместимых с кремниевой технологией, представляет одно из приоритетных направлений развития МДП-структур. Интересным перспективным решением является использование многослойных диэлектриков, в частности структур МНОП (металл-нитрид-оксид-полупроводник), где дополнительный слой нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) эффективно подавляет дрейф ионов. Оксиды редкоземельных элементов (ОРЗЭ) выделяются как перспективная альтернатива традиционному  $\text{SiO}_2$  благодаря комплексу улучшенных характеристик. Эти материалы демонстрируют напряженность поля пробоя не менее  $10^6$  В/см при низких токах утечки, обладают минимальными диэлектрическими потерями и значительно более высокой диэлектрической проникаемостью ( $\epsilon_i = 8\text{--}20$ ). Как отмечает И. Г. Бережной, технологическая совместимость оксидов редкоземельных металлов с существующими процессами производства кремниевых приборов, в сочетании с их химической и термической стойкостью, открывает возможности для создания МДП-структур с расширенными функциональными возможностями [7].

Отметим, что функционирование МДП-транзисторов в режиме определения ионизирующего излучения основано на регистрации изменения электрофизических параметров структуры под воздействием радиации. При облучении в объеме подзатворного диэлектрика происходит генерация электронно-дырочных пар, причем из-за существенно более высокой подвижности электронов по сравнению с дырками первые быстро покидают диэлектрик через контакты. Малоподвижные дырки под действием приложенного электрического поля дрейфуют к границе раздела диэлектрик-полупроводник, где локализованы энергетические ловушки, образованные структурными нарушениями диэлектрика. Захват дырок на ловушки формирует положительный объемный заряд вблизи границы раздела, что при положительной полярности напряжения на затворе приводит к сдвигу порогового напряжения транзистора [8]. Величина этого сдвига служит информативным параметром, количественно характеризующим поглощенную дозу ионизирующего излучения.

Конструктивно различают МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами проводимости. Транзисторы с индуцированным каналом изготавливаются на основе высокоомной кремниевой подложки р- или n-типа, в которую формируются области истока и стока противоположного типа проводимости. Канал проводимости в таких структурах возникает только при приложении к затвору напряжения, превышающего пороговое значение (рисунок 2) [9].

Транзисторы со встроенным каналом имеют проводящий слой между истоком и стоком уже в исходном состоянии, а управление током осуществляется изменением проводимости этого канала под действием напряжения затвора (рисунок 3) [9].

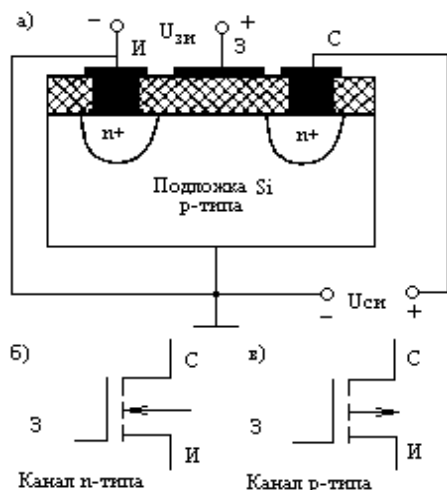


Рисунок 2 – МДП-транзистор с индуцированным каналом а) упрощенная структурная схема, б) условное обозначение для каналов n-типа, в) для каналов p-типа [9]

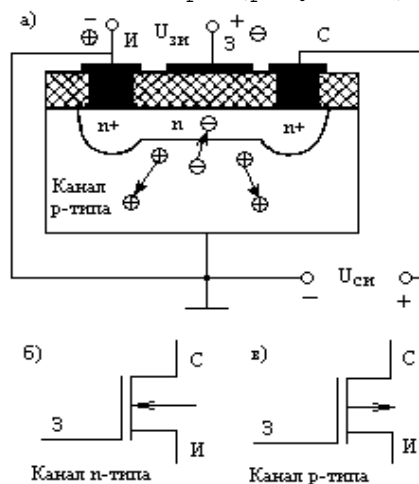


Рисунок 3 – МДП-транзистор со встроенным каналом а) упрощенная структурная схема для канала n-типа, б) условное обозначение для канала n-типа, в) для каналов p-типа [9]

Выбор типа транзистора определяется конкретным применением и требованиями к динамическим характеристикам детектора.

Говоря о применении МДП-структур для определения радиационных излучений, отметим, что оно, как правило, реализуется в двух основных конфигурациях: МДП-транзисторы (RADFET-сенсоры) и МДП-конденсаторы. Первые (RADFET-сенсоры) функционируют как интегральные дозиметры, накапливающие информацию о поглощенной дозе посредством необратимого изменения порогового напряжения. Под воздействием радиации в подзатворном диэлектрике происходит накопление положительного заряда, вызывающее измеримый сдвиг порогового напряжения, который коррелирует с интегральной поглощенной дозой [10]. Вторые же (МДП-конденсаторы) позволяют проводить более детальное исследование зарядовых процессов в диэлектрической пленке, что важно для понимания физических механизмов детектирования и оптимизации параметров сенсоров.

Отечественные исследования радиационного воздействия на полупроводниковые материалы выявили значительные изменения их электрофизических, рекомбинационных и оптических характеристик. Легирование кремниевых подложек МДП-структур редкоземельными элементами (например, иттербием и эрбием), приводит к увеличению плотности поверхностных состояний и образованию положительного заряда на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> [11]. Данный эффект находит применение при создании специализированных сенсоров для атомной энергетики и космических приложений, где требуется повышенная чувствительность к определенным типам излучений. Введение редкоземельных элементов модифицирует энергетическую структуру границы раздела, создавая дополнительные центры захвата носителей заряда и изменяя динамику зарядовых процессов при облучении.

Помимо традиционных применений в дозиметрии, МДП-системы демонстрируют ряд специфических явлений, которые могут быть использованы для регистрации радиационных излучений и заряженных частиц. К таким явлениям относятся – зарядовая нестабильность, сильнополевая туннельная инжекция электронов и др. Использование этих эффектов наряду с традиционным пробоем, как отмечается в научной литературе, позволяет создавать многофункциональные сенсоры, сочетающие достоинства полупроводниковых детекторов радиации и тонкопленочных пробойных счетчиков, что расширяет возможности применения МДП-структур для регистрации низкоэнергетических частиц [8].

## 2. Обзор принципов реализации ДИИ

Физические принципы функционирования МДП-структур формируют основу для создания специализированных радиационных сенсоров, при разработке которых основным требованием выступает миниатюризация при сохранении метрологических характеристик. Традиционные системы радиационного контроля, основанные на газонаполненных счетчиках и крупногабаритных сцинтилляционных детекторах, требуют специализированной инфраструктуры и характеризуются значительными массогаба-



ритными параметрами. Переход к твердотельным полупроводниковым системам позволяет решить эти ограничения, что стимулировало развитие нескольких направлений миниатюризации детекторов.

RADFET-технология, основанная на р-канальных МОП-транзисторах, получила признание благодаря компактности, высокой чувствительности и возможности непосредственного считывания показаний [12]. Развитие RADFET-дозиметров началось в 1970-х годах с работ А. Holmes-Siedle, который предложил использовать изменение порогового напряжения МОП-транзистора (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (полевой транзистор металл-оксид-полупроводник)) для измерения накопленной дозы [13]. Последующие десятилетия характеризовались совершенствованием конструкции и технологии изготовления этих устройств. Двухдиэлектриковые МОП-дозиметры, разработанные в 1990-х годах, включают структуру из слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на высококачественном термическом оксиде  $\text{SiO}_2$ , что обеспечивает улучшенные характеристики захвата заряда [14]. Современные RADFET-устройства выпускаются с различными толщинами оксидного слоя, что определяет их чувствительность и диапазон измеряемых доз. Устройства с оксидом толщиной 400 нм демонстрируют среднее затухание сигнала около 4% через 5 дней после облучения в несмещенном режиме, что заметно ниже по сравнению с 13,5% для смещенных образцов [15]. Температурная зависимость параметров может компенсироваться работой в точке нулевого температурного коэффициента при считывании показаний [16].

Требования к современным компактным детекторам ионизирующих излучений определяются спецификой их применения в различных областях. Для медицинских процедур (интраоперационная радиотерапия и персональная дозиметрия) важными параметрами выступают малые размеры сенсора (порядка нескольких миллиметров), высокая чувствительность в диапазоне терапевтических доз и стабильность показаний при изменении температуры окружающей среды. Портативные дозиметры для полевых условий должны обладать автономностью работы, устойчивостью к механическим воздействиям и способностью функционировать в широком диапазоне климатических условий [17]. Промышленный сектор предъявляет специфические требования к компактным детекторам, используемым для контроля радиационной безопасности на производственных объектах: детекторы должны обеспечивать непрерывный мониторинг радиационного фона, иметь возможность дистанционной передачи данных и демонстрировать длительный срок службы без необходимости частого обслуживания. Космические применения накладывают наиболее жесткие ограничения: сенсоры должны функционировать в условиях экстремальных температур, высокого вакуума и интенсивных радиационных потоков при минимальном энергопотреблении и массе [12].

Наряду с RADFET-технологией, в академическом дискурсе и промышленной практике рассматриваются альтернативные подходы к миниатюризации детекторов радиационных излучений. Каждое из этих направлений характеризуется специфическими физическими принципами детектирования и областями применимости.

MSND (Microstructured Semiconductor Neutron Detector (микроструктурированный полупроводниковый нейтронный детектор)) реализуют трехмерную архитектуру для повышения эффективности детектирования нейтронов при сохранении компактных размеров. Идея основана на создании глубоких микроканалов, вытравленных в высокоомной кремниевой подложке n-типа ( $\rho > 5000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) и заполненных нейтронно-реактивным материалом, преимущественно обогащенным  $^6\text{LiF}$ . Конформные  $p^+-n$  переходы формируются по всей поверхности микроканалов методом диффузии или ионной имплантации акцепторных примесей. Геометрия микроструктур оказывает определяющее влияние на эффективность регистрации: прямые микроканалы глубиной до 100 мкм с шириной 10–20 мкм и шагом 30–40 мкм обеспечивают высокую плотность упаковки конверсионного материала. Заполнение микроканалов обогащенным  $^6\text{LiF}$  осуществляется методом центрифугирования наночастиц, обеспечивающим коэффициент заполнения около 35% [18]. Технология позволяет повысить эффективность обнаружения тепловых нейтронов до 30–40 % при толщине устройства менее 1 мм и рабочем напряжении ниже 5 В, что делает MSND привлекательными для портативных систем нейтронной дозиметрии и геологоразведки [19].

Диоды Шоттки на основе карбида кремния (4H-SiC) решают вопрос функционирования в экстремальных условиях благодаря широкой запрещенной зоне (3,26 эВ – втрое больше, чем у кремния). В академической среде были продемонстрированы SiC-электроника и схемы, функционирующие при температурах порядка сотен градусов (показаны стабильные работы при  $\sim 500^\circ\text{C}$  в ряде экспериментов и тестов) [20]. Высокая теплопроводность 4H-SiC (порядок  $3,7\text{--}4,9 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , что соответствует  $\sim 370\text{--}490 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  в привычных единицах) способствует эффективному отводу тепла и облегчает управление рабочей температурой фронтальной электроники, что полезно в компактных системах с близкорасположенной электроникой. Кроме того,

энергия порогов смещения атомов (threshold displacement energies) в SiC (типичные значения: C $\approx$ 20–21 eV, Si $\approx$ 35–38 eV, в зависимости от методики и направления) выше, чем у кремния, что делает образование смещений атомов более энергоёмким и в целом повышает устойчивость структур на SiC к дислокационным повреждениям при ионизирующем и нейтронном облучении. Это одна из причин лучшей радиационной стойкости SiC-детекторов по сравнению с Si [21]. Датчики на основе 4H-SiC реализуются преимущественно в виде диодов Шоттки или структур металл-изолятор-полупроводник (МИП; по англ. – MIS – Metal-Insulator-Semiconductor), которые будут рассмотрены отдельно. Схема диода с барьером Шоттки на основе 4H-SiC, используемого для обнаружения радиации, представлена ниже (рис. 4) [20]. Образцы на эпитаксиальных слоях толщиной порядка 50  $\mu\text{m}$ , демонстрировали высокое энергетическое разрешение (в зарубежной литературе приводятся разные значения в зависимости от технологии и геометрии – от долей процента до нескольких процентов для  $^{41}\text{Am}/^{241}\text{Am}$ ), причём лучшие работы показывали разрешение порядка 0.5–3% при комнатной температуре для подходящих конфигураций и низкошумных схем считывания [22, 23].

На рисунке 4 [20] представлена схема диода с барьером Шоттки на основе 4H-SiC, используемого для детектирования ионизирующего излучения.

SiC-детекторы также показывают хорошую стойкость к нейтронному облучению: в экспериментах с 4H-SiC изучали образцы, облучённые нейтронным флюенсом до  $\sim 10^{16} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$  и выше; при таких флюенсах отмечается снижение CCE (Charge Collection Efficiency (эффективность сбора заряда)), которое частично компенсируется увеличением обратного напряжения, но полное разрушение работоспособности наступает при гораздо больших суммарных повреждениях по сравнению с кремниевыми детекторами. Таким образом, 4H-SiC подходит для применения в реакторных и иных высокофлюентных средах (подробные экспериментальные исследования и обзоры рассмотрены в ряде зарубежных работ) [24]. Применение SiC для регистрации нейтронов опирается как на ядерные реакции в самом материале (например, ветви реакций в кремнии и углероде:  $^{28}\text{Si}(n, \alpha)^{25}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$ ,  $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$  и др.), так и на схемы с тонкими конверсионными слоями, внешними мишенями или замедляющими прослойками; в экспериментальных установках демонстрировалась пригодность тонких SiC-диодов для регистрации быстрых нейтронов (часто в импульсных режимах и с подходящей электроникой).

Детекторы на основе гексагонального нитрида бора (h-BN – hexagonal Boron Nitride (гексагональный нитрид бора)) выделяются благодаря большому сечению захвата тепловых нейтронов изотопом  $^{10}\text{B}$  (3835 барн – внесистемная единица измерения площади, используется в ядерной физике для измерения эффективного сечения ядерных реакций) и сверхширокой запрещенной зоне (около 6 эВ). В свежих исследованиях 2025 года детекторы на основе h-BN, обогащенного  $^{10}\text{B}$ , достигли рекордной собственной эффективности регистрации тепловых нейтронов 60% при толщине активной области 100 мкм [25]. Конструктивно h-BN детектор представляет собой объемную структуру, где материал h-BN расположен между металлическими электродами; детектирование осуществляется регистрацией ионизации, создаваемой продуктами ядерной реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  в толще h-BN. Преимуществом h-BN выступает способность одновременного детектирования тепловых и быстрых нейтронов одним сенсором, что упрощает конструкцию систем мониторинга в смешанных нейтронных полях. Академическое сообщество обсуждает перспективы создания нейтронных детекторов на основе h-BN с помощью эпитаксии из газовой фазы галогенидов, которые, помимо очевидной сниженной стоимости, по заявлению авторов, найдут «беспрецедентное применение в ядерной энергетике, национальной безопасности, мониторинге ядерных отходов и обращении с ними, промышленности здравоохранения и материаловедении» [26].

Дополнительно отметим и иные направления, развиваемые параллельно:

PIN-диоды (диод со структурой p-i-n) на кремнии и германии обеспечивают быстрое действие и линейность отклика, применяются в спектрометрии, однако требуют охлаждения для снижения темновых токов [1];

детекторы на теллуриде кадмия-цинка (CdZnTe) функционируют при комнатной температуре, демонстрируют высокое энергетическое разрешение, но ограничены высокой стоимостью и технологическими трудностями выращивания кристаллов;

сцинтилляционные детекторы с кремниевыми фотодиодами сочетают малогабаритные сцинтилляторы (CsI(Tl), LYSO) с полупроводниковыми фотоприемниками, пригодны для регистрации гамма-излучения в широком энергетическом диапазоне.

Указанные технологии, имеющие специфические области применимости, дополняют возможности МДП-структур. Микроструктурированные детекторы и структуры на SiC и h-BN демонстрируют выдающиеся характеристики в своих нишах – нейтронное детектирование и работа в жестких условиях соответственно. Однако они уступают

МДП-структурам по совместимости с планарной технологией микроэлектроники и возможности интеграции с обрабатывающей электроникой на одном кристалле. Именно потенциал интеграции и технологическая зрелость МДП-подхода стимулируют поиск инновационных решений – рассмотрим их подробнее.

### 3. Микроминиатюризация ДИИ

Значимым фактором в создании компактных датчиков радиационных излучений стал переход от традиционного диоксида кремния к диэлектрикам с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k диэлектрикам).

Оксид гафния ( $\text{HfO}_2$ ) выделяется среди high-k материалов благодаря диэлектрической проницаемости порядка 25, что в шесть раз превышает значение для  $\text{SiO}_2$ . Применение  $\text{HfO}_2$  в качестве подзатворного диэлектрика позволяет физически увеличить толщину изолирующего слоя при сохранении той же электрической емкости, что снижает туннельные токи утечки и повышает надежность структуры [27]. Исследования радиационной стойкости МОП-структур с  $\text{HfO}_2$  показали меньшую чувствительность к облучению по сравнению со структурами на основе  $\text{SiO}_2$ , что обусловлено иным механизмом захвата носителей заряда и особенностями дефектообразования в оксиде гафния [28].

Двухслойные диэлектрические структуры  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  объединяют преимущества обоих материалов. Тонкий слой  $\text{SiO}_2$  (10 нм или 5 нм), выращенный термическим окислением на кремниевой подложке, формирует высококачественную границу с низкой плотностью поверхностных состояний; поверх него расположен слой  $\text{HfO}_2$  (30 нм или 40 нм), который определяет основную ёмкость структуры [15]. RADFET-сенсоры с данной конфигурацией диэлектрика демонстрируют начальное пороговое напряжение  $-0,493$  В ( $\text{HfO}_2$  30 нм/ $\text{SiO}_2$  10 нм) и  $-0,654$  В ( $\text{HfO}_2$  40 нм/ $\text{SiO}_2$  5 нм), а также чувствительность 1,685 мВ/Гр (где мВ/Гр – милливольт на Грей – единица измерения поглощённой дозы ионизирующего излучения) и 0,78 мВ/Гр соответственно при облучении  $\text{Co-60}$  гамма-излучением в диапазоне 1–20 Гр. В сравнении с коммерческими RADFET на основе  $\text{SiO}_2$  толщиной 100 нм (чувствительность  $\sim 1,5$  мВ/Гр), 400 нм (55–65 мВ/Гр) и 1 мкм (135–324 мВ/Гр), структура  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  обеспечивает стабильную чувствительность при существенно меньшей толщине диэлектрика и рабочем напряжении, а также лучшую радиационную стойкость.

Оксиды редкоземельных элементов расширяют спектр доступных высокопроницаемых диэлектриков для МДП-структур. Некоторые исследования показывают, что добавление оксида гадолиния ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) в стек  $\text{HfO}_2$  может улучшать свойства диэлектрика – повышать диэлектрическую проницаемость, уменьшать ток утечки и снижать плотность фиксированных зарядов. Например, Rampillón et al. (2024) показали, что пленки  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , выращенные на Si с последующим плазменным окислением, сохраняют низкий ток утечки ( $\sim 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup> при  $V_{\text{gate}} \approx 1$ В) и хорошие характеристики интерфейса [29]. Легирование гадолинием снижает плотность кислородных вакансий в пленке  $\text{HfO}_2$  и улучшает ее структурное качество. Меньшая электроотрицательность и больший атомный радиус Gd по сравнению с Hf способствуют стабилизации аморфной фазы диэлектрика и подавлению нежелательной кристаллизации при термических обработках. Перспективность применения редкоземельных элементов в полупроводниковых приборах также показали и тонкоплёночные транзисторы на основе IGZO (Indium Gallium Zinc Oxide (оксид индия-галлия-цинка)) с затворным диэлектриком из оксида циркония, легированного иттрием, эрбием или иттербием. Введение небольшого количества редкоземельных примесей позволяет существенно снизить ток утечки через диэлектрик (до  $2,8\text{--}6,6 \times 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>), а также обеспечивает высокую удельную ёмкость (около 600–640 нФ/см<sup>2</sup>) и относительную диэлектрическую проницаемость в диапазоне 6,3–7,1. Транзисторы на основе таких структур работают при низком напряжении (до 3 В), демонстрируют насыщенную подвижность носителей до  $3,1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и отношение токов открытого и закрытого состояния порядка  $10^4$ . После легирования наблюдается положительный сдвиг порогового напряжения, а также повышение стабильности и улучшение морфологии поверхности диэлектрика, что положительно влияет на транспортные свойства структуры [30].

Отдельного внимания заслуживает оксид эрбия ( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) как затворный диэлектрик в МДП-структурах для радиационной дозиметрии. Исследования Kaya et al. (2018) показали, что МОП-транзисторы с подзатворным слоем  $\text{Er}_2\text{O}_3$  толщиной 100 нм демонстрируют значительно более высокую радиационную чувствительность по сравнению со стандартными  $\text{SiO}_2$ -структурами той же толщины. Данный эффект связан с захватом существенно большего количества положительных зарядов в  $\text{Er}_2\text{O}_3$  при облучении, что приводит к увеличенному сдвигу порогового напряжения [31]. Однако фединг (спад сигнала после облучения) у  $\text{Er}_2\text{O}_3$ -структур составляет 24% за две недели при комнатной температуре против 11,9% для  $\text{SiO}_2$ , что может быть связано с более

высокой концентрацией мелких ловушек вблизи границы диэлектрик-кремний. Полученные результаты указывают на перспективность  $\text{Er}_2\text{O}_3$  для применения в персональной дозиметрии при условии учета температурно-временных зависимостей.

Отметим, что технологические аспекты формирования high-k диэлектриков также важны для достижения требуемых характеристик детекторов. Метод ALD (Atomic Layer Deposition (атомно-слоевое осаждение)) обеспечивает прецизионный контроль толщины пленок с точностью до монослоя и превосходную конформность покрытия сложно-рельефных поверхностей. Цифровая природа процесса ALD позволяет задавать толщину пленки количеством циклов осаждения, причем скорость роста определяется поверхностной химией и слабо зависит от небольших вариаций температуры, давления или длительности импульсов реагентов при условии обеспечения насыщения поверхности. Для формирования пленок  $\text{HfO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  используются металлоорганические прекурсоры на основе гафния и циркония, которые не взаимодействуют друг с другом деструктивно в процессе ALD, что позволяет создавать смешанные оксиды Hf-Zr с произвольным соотношением компонентов [32].

Развитие классической МДП-архитектуры представляют собой металл-нитрид-оксид-полупроводниковые (МНОП) структуры, где подзатворный диэлектрик состоит из двух слоев: тонкого термического оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и расположенного поверх него слоя нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) (рисунок 5).

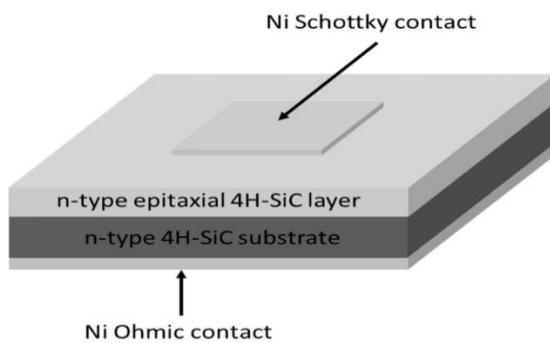


Рисунок 4 – Схема диода с барьером Шоттки на основе 4H-SiC, используемого для обнаружения радиации. NiSchottkycontact – никелевый контакт Шоттки, n – typeepitaxial 4H-SiClayer – эпитаксиальный слой 4H-SiC, n – type 4H-SiCsubstrate – подложка из 4H-SiCn – типа, NiOhmiccontact – никелевый омический контакт

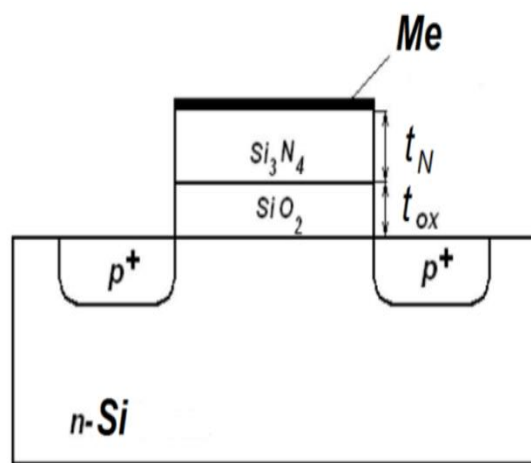


Рисунок 5 – Типовая структура полевого транзистора p-МНОП [33]

Подобная конфигурация, впервые предложенная в 1960-х годах для энергонезависимой памяти, нашла применение в 1980-ых гг. в радиационной дозиметрии благодаря улучшенным характеристикам захвата заряда – например, это прослеживается в патенте US4213045A американских коллег. Двухслойная диэлектрическая структура МНОП обеспечивает несколько преимуществ. Слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  эффективно подавляет дрейф ионов щелочных металлов, который выступает одним из основных факторов нестабильности традиционных  $\text{SiO}_2$ -структур. Захват дырок происходит преимущественно на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ , что пространственно отделяет захваченный заряд от границы полупроводник-диэлектрик и снижает влияние граничных состояний на сигнал сенсора [33]. Современные p-MNOS транзисторы, разработанные в 1990-х годах, включают структуру из слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 100–200 нм на высококачественном термическом оксиде  $\text{SiO}_2$  толщиной 50–150 нм. Исследования радиационного отклика p-MNOS RADFET показали, что эти устройства могут функционировать как интегральные дозиметры для космических применений с минимальной зависимостью от мощности дозы. В работе 34 показано, что p-MNOS дозиметры сохраняют линейный отклик в широком диапазоне мощностей доз, что критично для космических миссий, где радиационная обстановка варьируется от фоновых уровней до интенсивных солнечных протонных событий. Важной особенностью МНОП-структур является возможность восстановления (стирания накопленного заряда) путем приложения отрицательного напряжения к затвору или термического отжига, что позволяет повторное использование сенсора. Дополнительные (уже более современные) исследования показали наличие эффекта повышенной чувствительности при низких мощностях доз (ELDRS – Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (повышенная чувствительность при низких мощностях доз)) в толстых оксидах p-MNOS RADFET. Отечественные ученые провели

детальное экспериментальное исследование электрических характеристик стековых р-MNOS транзисторов, облученных при различных мощностях доз и температурах, и предоставили убедительные доказательства проявления ELDRS в толстых оксидах данных структур (толщина слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  составляла 150 нм, а  $\text{SiO}_2$  – 500 нм) [34]. Данное явление, как представляется, является скорее вызовом для калибровки дозиметров, поскольку устройства, откалиброванные при высоких мощностях доз, могут существенно недооценивать дозу при низких мощностях. Однако понимание механизмов ELDRS открывает возможности для разработки компенсационных алгоритмов и оптимизации режимов работы сенсоров.

Кремний-на-изоляторе (КНИ, англ. SOI – Silicon On Insulator) представляет перспективную платформу для создания компактных детекторов благодаря сниженной паразитной емкости и токам утечки по сравнению с объемными кремниевыми структурами. Детекторы на основе SOI демонстрируют улучшенные характеристики – зарубежными исследователями отмечена чувствительность (responsivity) до 1510 В/Вт и  $\text{NEP} \approx 22.65 \text{ пВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  для FD SOI CMOS (FD SOI – Fully Depleted Silicon-On-Insulator (полностью обеднённый кремний-на-изоляторе); CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник)), что превосходит или сопоставимо с большинством аналогов на обычном кремнии [35]. Также отмечаются повышенная чувствительность, сниженные паразитные емкости и сниженный шум благодаря улучшенной тепловой изоляции и интеграции с CMOS.

Технология SOI обеспечивает возможность формирования термически изолированных структур, что упрощает реализацию МЭМС-компонентов (микроэлектромеханические системы) в составе детекторов. Оксидный слой служит стоп-слоем при травлении подложки с обратной стороны методом глубокого реактивного ионного травления, что позволяет создавать миниатюрные устройства со сложной трехмерной геометрией. D-микродозиметры на SOI, разработанные несколькими международными группами, включают цилиндрические и грибовидные (mushroom) структуры с активными слоями толщиной от 2 до 50 мкм. Такие устройства демонстрируют эффективный и равномерный сбор заряда в пределах четко определенного чувствительного объема, гарантируя точное извлечение микродозиметрических величин из измеренных спектров [36].

Туннельные полевые транзисторы (TFET – Tunnel Field-Effect Transistor (туннельный полевой транзистор)) на SOI также рассматриваются как кандидаты для радиационной дозиметрии. Нидерландские коллеги провели TCAD-моделирование (Technology Computer-Aided Design (технологическое автоматизированное проектирование)) влияния ионизирующего излучения на SOI TFET и сравнили его с SOI MOSFET [Dubey, 2019]. Исследование показало, что в подпороговой области сдвиг тока стока в SOI TFET более зависим от дозы гамма-излучения, чем в области сильной инверсии. Авторы заключили, что SOI TFET может применяться в качестве дозиметра, особенно для космических или медицинских приложений, где требуется низкое энергопотребление [37].

МОП-структуры на основе карбида кремния (SiC-MOS) обладают преимуществами SiC как широкозонного полупроводника с архитектурой металл-оксид-полупроводник. MOS/МИП-структуры на SiC с оптимизированной поверхностью и тонким слоем пассивации (например, тонкая  $\text{SiO}_2$  или другие пассивации) демонстрируют низкие плотности утечки при больших обратных напряжениях и высокую эффективность сбора заряда; в ряде работ сообщены значения тока утечки на уровне наноампер на площадь при сотнях вольт обратного смещения (зависит от конструктивных деталей и качества эпитаксии) [38].

Тем не менее, хотя SiC-MOSFET для силовой электроники активно развиваются, их применение в качестве радиационных сенсоров находится на начальных стадиях исследований. В работе [39] приведен обзор радиационно-индуцированной деградации SiC MOSFET, где проанализировано влияние различных типов излучения (гамма-лучи, тяжелые ионы, электроны, протоны, нейтроны) на главные параметры транзистора – пороговое напряжение, подвижность носителей, токи утечки и сопротивление в открытом состоянии. Исследование показало, что облучение приводит к уменьшению порогового напряжения, снижению подвижности и увеличению токов утечки, преимущественно вследствие накопления заряда в затворном оксиде и генерации интерфейсных ловушек на границе  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ . Однако радиационная стойкость SiC MOSFET остается существенно выше, чем у кремниевых аналогов, благодаря большей энергии связи и высоким пороговым энергиям смещения атомов в SiC.

Отметим, что применение SiC-MOS структур именно для дозиметрии требует оптимизации затворного диэлектрика. Традиционный термический  $\text{SiO}_2$  на SiC характеризуется более высокой плотностью состояний ( $\sim 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ ) по сравнению с Si/SiO<sub>2</sub> ( $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ ), что обусловлено наличием углерода на границе раздела

и формированием дефектных комплексов. Для дозиметрических применений высокая начальная плотность ловушек может рассматриваться как преимущество, обеспечивающее повышенную чувствительность к радиационно-индуцированному заряду, при условии контролируемых и воспроизводимых характеристик.

Использование коммерческих МОП-транзисторов (p-MOS, например 3N163 и аналоги) в роли недорогих дозиметров подтверждено рядом экспериментов, что открывает перспективы создания недорогих систем мониторинга и, безусловно, является инновационным решением. Проведенные еще в начале 2000-ых гг., а в последствие неоднократно подтвержденные исследования p-канального транзистора 3N163, широкодоступного компонента маломощной МОП-технологии, выявили его применимость в качестве гамма-дозиметра при облучении в режиме, когда все выводы замкнуты вместе [17]. Хотя подобный режим характеризуется пониженной чувствительностью из-за отсутствия электрического поля для разделения электронно-дырочных пар, он компенсируется удобством применения, поскольку не требует внешних соединений во время облучения, что повышает комфорт пациентов и упрощает использование неквалифицированным персоналом. Чувствительность транзистора 3N163 составляет 5–10 мВ/Гр, линейность сохраняется до доз 58 Гр (эквивалент в воздухе), а погрешность чувствительности при индивидуальной калибровке не превышает 1% [17]. Вертикальные двойные диффузионные МОП-транзисторы (DMOS – Double-Diffused Metal-Oxide-Semiconductor (двойной диффузионный МОП-транзистор)), такие как ZVP3306, ZVP4525 и BS250F, также находят применение в радиотерапии. В работе [41] исследовали отклик этих транзисторов на электронные пучки 6 МэВ в несмещенном режиме и обнаружили чувствительность 3,1 мВ/Гр для BS250F, 3,4 мВ/Гр для ZVP4525 и 3,7 мВ/Гр для ZVP3306. Линейность сохранялась в диапазоне доз до 25 Гр [40]. Разработанная на основе ZVP3306 дозиметрическая система с пассивной NFC-меткой и смартфоном в качестве считывателя продемонстрировала чувствительность  $(4,75 \pm 0,15)$  мВ/Гр с разрешением 17 сГр, что делает подобную архитектуру привлекательной для миниатюрных носимых дозиметров.

Примечательно, что стековые (объединенные) конфигурации коммерческих МОП-транзисторов, где несколько транзисторов соединяются последовательно на одном кристалле, увеличивают суммарный сдвиг порогового напряжения пропорционально количеству устройств в стеке. К примеру, двухтранзисторная стековая конфигурация на базе 3N163 демонстрирует чувствительность  $33 \pm 2$  мВ/Гр в режиме без смещения и  $62 \pm 3$  мВ/Гр в режиме со смещением при облучении фотонным пучком 6 МэВ. Воспроизводимость параметров стековых конфигураций сопоставима с характеристиками специализированных RADFET, тогда как короткосрочное фединг (спад сигнала после облучения) у коммерческих транзисторов выше.

Системы на кристалле (System-on-Chip, SoC) также используются для радиационной дозиметрии. Они объединяют сенсорный элемент, аналоговую электронику обработки сигналов и цифровые блоки управления на единой полупроводниковой подложке. Здесь отметим предложенную в качестве патента концепцию радиационной интегральной схемы (RADIC – RADiation Integrated Circuit (радиационная интегральная схема)) – авторы предлагают архитектуру, включающую два RADFET и два обычных МОП-транзистора на общем кристалле. Один RADFET облучается с положительным смещением затвора (прямое смещение), другой – без смещения или с обратным смещением. Дифференциальное измерение сдвигов пороговых напряжений двух RADFET с усилением, реализованным на принципах МОП-инвертора, обеспечивает увеличение выходного сигнала и автоматическую температурную компенсацию. Данная архитектура снижает требования к внешней электронике считывания и уменьшает общие размеры дозиметра.

Систематизируя описанные выше различные подходы к созданию компактных детекторов, обобщим кратко их особенности и области применения в таблице 1.

Анализ представленных решений позволяет выявить три взаимодополняющих вектора развития МДП-датчиков: материаловедческий (high-k диэлектрики, OP3Э), платформенный (SOI, SiC-МОП, МНОП) и системный (коммерческие MOSFET, SoC). Наиболее зрелыми технологиями выступают high-k диэлектрики и коммерческие MOSFET, уже нашедшие применение в клинической дозиметрии.

**Заключение.** Проведенный обзор инновационных решений в области компактных МДП-датчиков радиационных излучений демонстрирует переход от традиционных кремний-диоксидных структур к многокомпонентным системам с оптимизированными функциональными характеристиками. Применение высокопроницаемых диэлектриков и многослойных конфигураций позволяет достичь повышенной чувствительности при сохранении миниатюрных размеров устройств, использование платформ SOI и широкозонных полупроводников расширяет температурный диапазон и радиационную стойкость детекторов, а интеграция сенсорных элементов с обрабатывающей электроникой на

одном кристалле формирует основу для автономных дозиметрических систем следующего поколения. Дальнейшее развитие технологии связано с оптимизацией интерфейсных характеристик новых диэлектрических материалов, разработкой алгоритмов компенсации температурно-временных зависимостей и созданием универсальных платформ для одновременной регистрации различных типов излучений.

Таблица 1

Инновационные технологии компактных МДП-датчиков радиационных излучений

| Технология                                         | Ключевая инновация                                                      | Основное преимущество                                                             | Стадия развития                                            | Область применения                                          |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| High-k диэлектрики (HfO <sub>2</sub> , OP3Э)       | Повышенная $\epsilon$ , двухслойные структуры                           | Увеличенная чувствительность, низкие токи утечки, радиационная стойкость          | Коммерческое применение, активные исследования             | Дозиметрия, космос, медицина                                |
| МНОП-структуры                                     | Двухслойный диэлектрик Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> | Подавление дрейфа ионов, улучшенный захват заряда, низкий фединг                  | Коммерческое применение                                    | Высокодозовая дозиметрия, космос                            |
| SOI-платформа                                      | Термическая изоляция, сниженные паразитные емкости                      | Повышенная чувствительность, интеграция с CMOS, 3D-микродозиметрия                | Лабораторные образцы, ограниченное коммерческое применение | Микродозиметрия, космическая дозиметрия, медицинская физика |
| SiC МОП-детекторы                                  | Широкая запрещенная зона, МИП-структура с SiO <sub>2</sub>              | Высокотемпературная работа (до 500°С), радиационная стойкость, низкие токи утечки | Прототипы, мелкосерийное производство                      | Реакторный контроль, космос, экстремальные условия          |
| Коммерческие MOSFET (3N163, ZVP3306, CD4007 и др.) | Использование серийных компонентов                                      | Низкая стоимость, доступность, приемлемая чувствительность                        | Коммерческое применение                                    | Медицинская дозиметрия, персональная дозиметрия             |
| RADIC/SoC                                          | Интеграция RADFET с электроникой на одном кристалле                     | Усиление сигнала, температурная компенсация, компактность                         | Патент, разработка прототипов                              | Персональная дозиметрия, космос, автономные системы         |

Благодарности: Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSFN-2024-0086.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / под ред. Ю.К.Акимова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 433 с.
2. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М. Активный чувствительный элемент сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими слоями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. С. 118-127.
3. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
4. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: учеб. пособие. – М.: Техносфера, 2005. 492 с.
5. Левченко А., Межов-Деглин Л., Chikina I., Шикин В. Вольт-фарадные явления в структурах металл-диэлектрик-полупроводник (Обзор) // Физика низких температур. 2019. Т. 45, № S8-1. С. 965-985.
6. Pershenkov V.S., Popov V.D., Shalimov A.V. The surface radiation effects in IMS. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. 187 pp.
7. Бережной И.Г. Электрические свойства кремниевых МДП-структур с оксидами гадолиния, иттербия, лютения и самария в качестве диэлектрика: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10. – Воронеж, 2005. 20 с.
8. Андреев В.В., Столяров А.А., Соловьев И.В. Установка измерения поглощенной дозы радиационного излучения на основе транзисторных сенсоров со структурой металл – диэлектрик – полупроводник // Инженерный журнал: наука и инновации, 2014, вып. № 1. N1197.
9. Ширин И.Я. Схемотехника аналоговых и цифровых устройств: учебное пособие. – Минск: БНТУ, 2004. 85 с.
10. Романов А.В. Зарядовые процессы в МДП-структурах в условиях радиационных воздействий и сильнополевой инжекции электронов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2018. 17 с.
11. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Далиев Ш.Х. и др. Изучение влияния радиации на параметры МДП-структур с примесями иттербия и эрбия // Естественные и технические науки. 2012. № 1(57). С. 47-50.
12. Ristić G., Andjelković M., Jakšić A. The behavior of fixed and switching oxide traps of RADFETs during irradiation up to high absorbed doses // Applied Radiation and Isotopes. 2015. Vol. 102. pp. 29-34.

13. Holmes-Siedle A. The space-charge dosimeter: General principles of a new method of radiation detection // Nuclear Instruments and Methods. 1974. Vol. 121. PP. 169-179.
14. Nedev N., Manolov E., Nesheva D., Krezhov K., Nedev R., Curiel M., Valdez Salas B., Mladenov A., Levi Z. Radiation Dosimeter Based on Metal-Oxide-Semiconductor Structures Containing Silicon Nanocrystals // Key Engineering Materials. 2011. Vol. 495. pp. 120-123.
15. Marjanović M., Ilić S.D., Veljković S., Mitrović N., Gurer U., Yilmaz O., Kahraman A., Aktag A., Karacali H., Budak E., Danković D., Ristić G., Yilmaz E. The SPICE Modeling of a Radiation Sensor Based on a MOSFET with a Dielectric HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Double-Layer // Sensors. 2025. Vol. 25, No. 2. Article 546.
16. Andreev K.A., Vlasov A.I., Shakhnov V.A. Silicon pressure transmitters with overload protection // Automation and Remote Control. 2016. T. 77. № 7. pp. 1281-1285.
17. Asensio L.J., Carvajal M.A., López-Villanueva J.A., Vilches M., Lallena A.M., Palma A.J. Evaluation of a low-cost commercial MOSFET as radiation dosimeter // Sensors and Actuators A: Physical. 2006. Vol. 125, No. 2. pp. 288-295.
18. Shultis J., McGregor D. Design and performance considerations for perforated semiconductor thermal-neutron detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2009. Vol. 606. pp. 608-636.
19. Rotunda SciTech. Microstructured Semiconductor Neutron Detector (MSND®) Tile [Electronic resource]. URL: <https://www.rotundascitech.com/products/microstructured-semiconductor-neutron-detector-msnd%C2%AE> (дата обращения: 28.10.2025).
20. Capan I. 4H-SiC Schottky Barrier Diodes as Radiation Detectors: A Review // Electronics. 2022. Vol. 11, No. 4. Article 532.
21. Li W., Wang L., Bian L., Dong F., Song M., Shao J., Jiang S., Guo H. Threshold displacement energies and displacement cascades in 4H-SiC: Molecular dynamic simulations // AIP Advances. 2019. Vol. 9. Article 055007.
22. Sandeep K.C., Kleppinger J.W., Mandal K.C. Radiation detection using fully depleted 50 µm thick Ni/n-4H-SiC epitaxial layer Schottky diodes with ultra-low concentration of Z1/2 and EH6/7 deep defects // Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 128, No. 11. Article 114501.
23. Mandal K.C., Chaudhuri S.K., Nguyen K. An overview of application of 4H-SiC n-type epitaxial Schottky barrier detector for high resolution nuclear detection // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. Vol. 67, No. 9. pp. 2233-2241.
24. Gaggl P.P., Gsponer A., Thalmeier R., Waid S., Pellegrini G., Godignon P.P., Rafi J., Bergauer T. Performance of neutron-irradiated 4H-Silicon Carbide diodes subjected to Alpha radiation. arXiv:2210.08570, 2022.
25. Li J., Tingsuwatit A., Alemoush Z., Lin J.Y., Jiang H.X. Ultrawide bandgap semiconductor h-BN for direct detection of fast neutrons // APL Materials. 2025. Vol. 13, No. 1. Article 011101.
26. Alemoush Z., Tingsuwatit A., Almohammad M., Li J., Lin J.Y., Jiang H. Toward achieving cost-effective hexagonal BN semi-bulk crystals and BN neutron detectors via halide vapor phase epitaxy // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 122. Article 012105.
27. Kahraman A., Yilmaz E., Lok C.B. Effect of high-radiation-dose-induced structural modifications of HfSiO<sub>4</sub>/n-Si on electrical characteristics // Radiation Physics and Chemistry. 2022. Vol. 195. Article 110091.
28. Kang A.Y., Lenahan P.P., Conley J. The radiation response of the high dielectric-constant hafnium oxide/silicon system // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. Vol. 49. pp. 2636-2642.
29. Pampillón M.Á., Feijoo P.P.C., San Andrés E., García H., Castán H., Dueñas S. Scavenging effect on plasma oxidized Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown by high pressure sputtering on Si and InP substrates. arXiv:2401.17333, 2024.
30. Zhao X.-H., Zhuang J., Sun Q.-J., Tang Z., Tang X.-G., Roy V.A.L. Solution Processed Rare-Earth Doped High-k Dielectrics for Low-Power IGZO Transistors // SSRN Electronic Journal. 2023. No. 4333528.
31. Kaya S., Yilmaz E., Jaksic A. et al. FET-based radiation sensors with Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate dielectric // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 2018. Vol. 430. PP. 36-41.
32. Hausmann D.M., Kim E., Becker J., Gordon R.G. Atomic Layer Deposition of Hafnium and Zirconium Oxides Using Metal Amide Precursors // Chemistry of Materials. 2002. Vol. 14, No. 10. pp. 4350-4358.
33. Zimin P.P.A., Mrozovskaia E., Chubunov P.P.A., Anashin V., Zebrev G. Calibration and electric characterization of p-MNOS RADFETs at different dose rates and temperatures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2019. Vol. 940. PP. 99-105.
34. Schwank J.R., Roeske S.B., Beutler D.E., et al. A dose rate independent p-MNOS dosimeter for space applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. Vol. 43, No. 6. pp. 2671-2678.
35. Hasan M.R., Rassel S., Kim J.H., et al. Terahertz radiation detectors using CMOS compatible SOI substrates // Advanced Functional Materials. 2024. Vol. 34, No. 28. Article 2400313.
36. Livingstone J., Prokopovich D.A., Lerch M.L.F., Petasecca M., Reinhard M.I., Yasuda H., et al. Large area silicon microdosimeter for dosimetry in high LET space radiation fields: Charge collection study // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2012. Vol. 59, No. 6. PP. 3126-3132.
37. Dubey A., Narang R., Saxena M., Gupta M. Investigation of total ionizing dose effect on SOI tunnel FET // Superlattices and Microstructures. 2019. Vol. 133. Article 106186.
38. Ruddy F.H., Ottaviani L., Lyoussi A., Destouches C., Palais O., Reynard-Carette C. Performance and Applications of Silicon Carbide Neutron Detectors in Harsh Nuclear Environments // EPJ Web of Conferences. 2021. Vol. 253. Article 11003.
39. Baba T., Siddiqui N., Saidin N., Harwani S., Yusoff M., Fairus S., Sani B., Karim J., Hasbullah F. Radiation-induced degradation of silicon carbide MOSFETs - A review // Materials Science and Engineering: B. 2023. Vol. 300. Article 117096.
40. Martínez-García M., Simancas F., Palma A., Lallena A., Banqueri J., Carvajal M. General purpose MOSFETs for the dosimetry of electron beams used in intra-operative radiotherapy // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 210. pp. 175-181.



УДК 621.382

**Жалнин<sup>1</sup> В.П., Денисов<sup>2</sup> В.А., Шахнов<sup>3</sup> В.А.**

<sup>1,2,3</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия,

<sup>1,2,3</sup> shakhnov@iu4.bmstu.ru

### **АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ ДАТЧИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**Аннотация.** Представлен обзор современного состояния технологий датчиков ионизирующих излучений. Рассмотрены основные типы датчиков, принципы их работы, области применения, а также ключевые тенденции и перспективные направления развития. Проведен кластерный библиографический анализ. На основе анализа выявлены основные направления исследований, связанные с дозиметрическими технологиями, медицинскими применениями и инженерными аспектами разработки датчиков. Полученные результаты позволяют определить актуальные направления развития измерительных систем и могут быть использованы при проектировании и совершенствовании датчиков ионизирующих излучений.

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, металл – диэлектрик – полупроводник, инжекция зарядов, дозиметрические технологии

**Zhalnin<sup>1</sup> V.P., Denisov<sup>2</sup> V.A., Shakhnov<sup>3</sup> V.A.**

<sup>1,2,3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1,2,3</sup> shakhnov@iu4.bmstu.ru

### **ANALYSIS OF METHODS AND MEANS FOR IMPLEMENTING IONIZING RADIATION SENSORS**

**Abstract.** The paper presents a review of the current state of technologies for ionizing radiation sensors. The main types of sensors, their operating principles, areas of application, as well as key trends and promising directions for development are considered. To systematize scientific publications, a cluster bibliographic analysis. Based on the analysis, the main research directions related to dosimetric technologies, medical applications, and engineering aspects of sensor development were identified. The obtained results make it possible to determine relevant directions for the development of measurement systems and can be used in the design and improvement of ionizing radiation sensors.

**Keywords:** ionizing radiation, metal – insulator – semiconductor, charge injection, dosimetric technologies

#### **Введение**

Работа посвящена анализу и систематизации результатов исследований в области датчиков ионизирующих излучений (ДИИ) с применением методов библиографического и кластерного анализа научных источников. В условиях интенсивного развития ядерной энергетики, медицинской радиологии, промышленного неразрушающего контроля и систем радиационной безопасности возрастает роль точных, надёжных и адаптивных средств регистрации ионизирующих излучений [1-4]. Одновременно с этим наблюдается устойчивый рост числа научных публикаций, посвящённых как фундаментальным аспектам взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, так и прикладным вопросам разработки, проектирования и эксплуатации датчиков различного типа. Это обуславливает необходимость структурирования накопленных знаний и выявления ключевых направлений развития данной области.

Объектом исследования в настоящей работе являются датчики ионизирующих излучений и вопросы, посвящённых их разработке, применению и совершенствованию.

Предметом исследования являются методы и подходы к анализу и классификации методов и средств по тематике датчиков ионизирующих излучений, а также основные типы датчиков, их характеристики, области применения и тенденции развития, выявляемые на основе кластерного анализа библиографических данных.

Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями к системам радиационного контроля и измерения в различных отраслях техники и науки. Современные измерительные системы должны обеспечивать высокую чувствительность, точность и стабильность характеристик при одновременной миниатюризации, снижении энергопотребления и возможности интеграции с цифровыми и интеллектуальными системами обработки данных. Развитие новых материалов, микро- и наноэлектронных технологий, а также методов цифровой обработки сигналов приводит к появлению большого числа новых решений в области датчиков ионизирующих излучений. В этих условиях особую значимость приобретает анализ и обобщение существующих исследований, позволяющий выявить наиболее перспективные направления и определить приоритеты дальнейшего развития измерительных технологий.

Дополнительным фактором актуальности является активное внедрение наукометрических и библиометрических методов анализа научной информации. Применение кластерного анализа библиографических источников позволяет не только систематизировать публикации по тематическим направлениям, но и выявлять скрытые взаимосвязи между исследованиями, оценивать степень зрелости отдельных научных направлений и прогнозировать их дальнейшее развитие. Использование подобных методов в области датчиков ионизирующих излучений способствует формированию

целостного представления о современном состоянии данной области и её инженерных перспективах.

Обзор существующих решений и анализ литературы показывает, что в настоящее время датчики ионизирующих излучений представлены широким спектром технологий, включая газовые, сцинтилляционные, полупроводниковые и нейтронные детекторы. В работах [1–4] подробно рассмотрены физические основы регистрации ионизирующих излучений, принципы действия детекторов и методы дозиметрических измерений, что формирует фундаментальную базу для разработки современных измерительных систем. В работе [5] акцент сделан на сцинтилляционных и полупроводниковых детекторах, их метрологических характеристиках и областях применения в научных и медицинских исследованиях. Нормативно-техническая документация и государственные стандарты [6, 7] регламентируют терминологию, классификацию и общие технические требования к средствам измерений ионизирующих излучений, обеспечивая единство и сопоставимость результатов измерений. Современные исследования, представленные в публикациях последних лет, отражают тенденции к миниатюризации датчиков, повышению их чувствительности и интеграции с цифровыми системами обработки данных [8–10].

Известные и перспективные варианты реализации ДИИ характеризуются собственными преимуществами и ограничениями, связанными с чувствительностью, энергетическим разрешением, условиями эксплуатации и стоимостью. Наряду с традиционными решениями активно развиваются гибридные и специализированные технологии, ориентированные на конкретные прикладные задачи [11–17]. Однако большинство обзорных работ фокусируется либо на отдельных типах детекторов, либо на конкретных областях применения, что затрудняет формирование обобщённой картины развития технологий. В этой связи комплексный библиографический анализ с использованием методов кластеризации представляет собой эффективный инструмент для систематизации существующих решений.

Целью работы является анализ и систематизация научных публикаций по тематике датчиков ионизирующих излучений с использованием методов кластерного анализа, а также выявление ключевых направлений исследований и перспектив развития измерительных технологий.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать основные типы датчиков ионизирующих излучений, их принципы действия, преимущества и ограничения;
- выполнить сбор и предварительную обработку библиографических данных по тематике *ionizing radiation sensors*;
- провести кластерный анализ научных публикаций с использованием специализированного программного обеспечения;
- выявить и описать основные тематические кластеры исследований в области датчиков ионизирующих излучений;
- выполнить инженерную интерпретацию полученных результатов и определить перспективные направления развития датчиков и измерительных систем.

Источниками для выполнения исследований являются публикации в области радиационных измерений и датчиков ионизирующих излучений отраженные в международной базе *Lens.org*, обеспечивающей доступ к массивам научных публикаций и патентов по широкой тематике.

Методы, используемые в работе, включают методы анализа и синтеза научно-технической информации, элементы библиометрического и наукометрического анализа, а также методы кластерного анализа данных. Для визуализации и интерпретации результатов применяется специализированное программное обеспечение, позволяющее строить карты взаимосвязей ключевых терминов и тематических направлений. В инженерной части работы используются методы системного анализа и сравнительной оценки характеристик датчиков ионизирующих излучений.

Результатом работы является структурированный обзор современных исследований в области датчиков ионизирующих излучений, включающий классификацию основных типов детекторов, анализ их характеристик и областей применения, а также результаты кластерного анализа библиографических источников. Полученные результаты позволяют выявить ключевые научно-технические направления и могут быть использованы при проектировании, выборе и совершенствовании датчиков ионизирующих излучений для различных прикладных задач.

#### 1. Основные типы датчиков ионизирующих излучений

##### Классификация датчиков ионизирующего излучения

В предложенном обзоре рассматривается ряд типов датчиков ионизирующего излучения (ДИИ). Для более наглядного объяснения связи между ними показаны в виде ментальной карты на рис. 1.

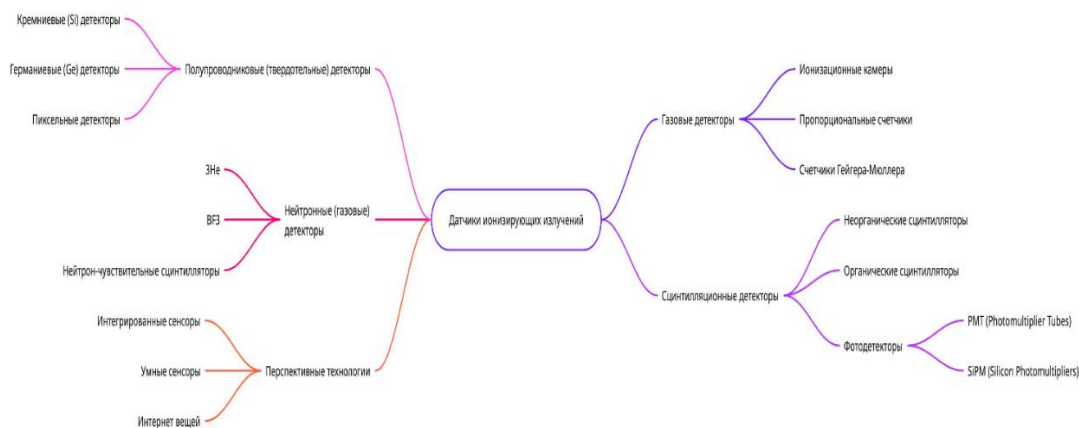


Рисунок 1 – Карта связей типов датчиков ионизирующего излучения

Проанализируем основные преимущества и недостатки различных типов ДИИ, а также рассмотрим перспективные направления развития технологии [1-4, 14-27].

#### Твердотельные детекторы

Твердотельные детекторы основаны на регистрации зарядов, образующихся в результате взаимодействия ионизирующего излучения с полупроводниковыми материалами [1, 3]. Наиболее распространёнными являются кремниевые и германиевые детекторы, обладающие высокой чувствительностью и хорошим разрешением [1]. Такие датчики широко применяются в спектрометрии, дозиметрии и медицинской диагностике. К преимуществам твердотельных детекторов относятся компактность, стабильность характеристик и возможность интеграции с электронными системами обработки сигналов. Ограничениями являются высокая стоимость отдельных типов детекторов и требования к температурному режиму эксплуатации.

#### Газовые детекторы

Газовые детекторы функционируют за счёт ионизации газа при прохождении ионизирующего излучения и последующего сбора ионов и электронов в электрическом поле. К данному классу относятся ионизационные камеры, пропорциональные счётчики и счётчики Гейгера-Мюллера [1, 4]. Газовые детекторы отличаются простотой конструкции, надёжностью и широким диапазоном регистрируемых доз излучения. Они находят применение в системах радиационного мониторинга и промышленного контроля. Вместе с тем такие датчики обладают сравнительно низким энергетическим разрешением по сравнению с твердотельными аналогами.

#### Фотонные и сцинтилляционные датчики

Сцинтилляционные датчики основаны на преобразовании энергии ионизирующего излучения в световые вспышки в сцинтилляционном материале с последующей регистрацией фотонного сигнала фотоприёмниками [3, 5]. В качестве сцинтилляторов применяются как неорганические кристаллы, так и органические материалы [5]. Данный тип детекторов характеризуется высокой скоростью отклика и возможностью регистрации различных видов излучений. Сцинтилляционные датчики широко используются в ядерной физике, медицинской визуализации и системах безопасности.

#### Другие типы и технологии

Помимо традиционных типов датчиков, активно развиваются альтернативные и гибридные технологии регистрации ионизирующего излучения. К ним относятся трековые детекторы, микроструктурированные газовые детекторы, а также датчики на основе новых функциональных материалов. Развитие данных направлений связано с повышением пространственного разрешения, снижением энергопотребления и расширением функциональных возможностей датчиков. Использование современных методов обработки данных способствует повышению эффективности таких систем и их адаптации к специализированным задачам.

#### 1.6. Сравнительный анализ датчиков ионизирующих излучений

Для более простой ориентации в преимуществах и недостатках основных типов датчиков проанализированная информация обобщена и представлена в таблице 1.

Полученная таблица позволяет быстро подобрать тип датчика под конкретную задачу, не прибегая к глубокому анализу текста статьи и источников литературы.

#### Тенденции развития технологий датчиков ионизирующих излучений

#### Материалы и конструкции

Современные технологии датчиков ионизирующих излучений характеризуются активным использованием новых материалов и совершенствованием конструктивных решений [3].

Сравнение характеристик основных типов датчиков

Таблица 1

| Тип датчика                                                                                            | Преимущества                                                                                                                                                   | Недостатки                                                                                                                                                       | Область                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Газовые детекторы (ионизационные камеры, пропорциональные счётчики, счётчики Гейгера-Мюллера)          | Простота конструкции; высокая надёжность; широкий диапазон регистрируемых доз; относительно низкая стоимость; устойчивость к перегрузкам                       | Низкое энергетическое разрешение; невозможность спектрометрического анализа; зависимость характеристик от состава и давления газа; сравнительно большие габариты | Радиационный мониторинг; дозиметрический контроль; промышленная и экологическая безопасность         |
| Сцинтилляционные детекторы (NaI(Tl), CsI и др.)                                                        | Высокая чувствительность; возможность спектрометрического анализа; малое время отклика; регистрация различных видов ионизирующего излучения                    | Необходимость применения фотоприёмников; чувствительность к температурным и механическим воздействиям; деградация сцинтилляционных свойств со временем           | Ядерная физика; медицинская диагностика; радиационный контроль и системы безопасности                |
| Полупроводниковые (твердотельные) детекторы (кремниевые, германиевые)                                  | Высокое энергетическое разрешение; компактные размеры; стабильность измерительных характеристик; возможность интеграции с цифровыми системами обработки данных | Высокая стоимость; требования к температурному режиму; чувствительность к радиационному повреждению                                                              | Спектрометрия; медицинская визуализация; научные исследования; высокоточный дозиметрический контроль |
| Нейтронные детекторы (на основе $^3\text{He}$ , $\text{BF}_3$ , нейтрон-чувствительных сцинтилляторов) | Эффективная регистрация нейтронного излучения; высокая селективность; применимость в ядерной энергетике и системах безопасности                                | Ограниченная доступность $^3\text{He}$ ; сложность конструкции; высокая стоимость; повышенные требования к экранированию и калибровке                            | Ядерная энергетика; радиационная безопасность; контроль ядерных материалов; научные исследования     |

В твердотельных детекторах применяются высокоочищенные полупроводниковые материалы, такие как кремний и германий, а также соединения с широкозонной структурой, обеспечивающие повышенную радиационную стойкость и температурную стабильность. В газовых детекторах совершенствуются составы рабочих газовых смесей и геометрия электродных систем, что позволяет улучшать чувствительность и линейность отклика. Для сцинтилляционных датчиков разрабатываются новые кристаллы и композитные материалы с повышенной световыходностью и сокращённым временем высвечивания, а также компактные фотоприёмные устройства, интегрируемые с цифровой электроникой [5].

#### Производители и основные модели

На мировом рынке датчиков ионизирующих излучений представлены как крупные международные производители, так и специализированные компании, ориентированные на научные и промышленные применения. Ассортимент продукции включает дозиметры, спектрометры, радиометры и многоканальные системы регистрации. Современные модели отличаются модульной архитектурой, возможностью цифровой обработки сигналов и интеграцией с программным обеспечением для анализа данных [1, 2]. Тенденцией последних лет является создание универсальных приборов, способных работать с несколькими типами детекторов и обеспечивать высокую точность измерений в широком диапазоне энергий.

#### Применение в различных областях

Датчики ионизирующих излучений находят широкое применение в различных сферах деятельности. В медицине они используются в диагностических и терапевтических установках, включая радиологическую визуализацию и лучевую терапию, где особое значение имеют точность и стабильность измерений. В ядерной энергетике датчики

применяются для контроля радиационной обстановки, мониторинга технологических процессов и обеспечения безопасности персонала. В области безопасности и радиационного контроля такие устройства используются для обнаружения и идентификации источников излучения, а также в системах экологического мониторинга. Разнообразие областей применения определяет высокие требования к надёжности, чувствительности и адаптивности современных датчиков.

Анализ тенденций и инновации в датчиках ионизирующих излучений

Улучшение чувствительности и точности

Одной из ключевых тенденций развития датчиков ионизирующих излучений является повышение их чувствительности и точности измерений. Это достигается за счёт использования новых детекторных материалов, оптимизации геометрии чувствительных элементов и совершенствования методов обработки сигналов [3, 4]. Существенную роль играет внедрение цифровых алгоритмов фильтрации и калибровки, позволяющих снизить уровень шумов и повысить энергетическое и пространственное разрешение. Повышение точности измерений особенно важно для медицинских и научных применений, где требуется надёжная регистрация малых доз излучения.

Миниатюризация и портативность

Современные исследования направлены на уменьшение габаритов и массы датчиков при сохранении или улучшении их эксплуатационных характеристик. Миниатюризация достигается благодаря развитию микроэлектронных технологий, использованию интегральных схем и компактных фотоприёмных устройств [2, 3]. Портативные датчики ионизирующих излучений находят применение в персональной дозиметрии, полевых измерениях и системах оперативного радиационного контроля. Снижение энергопотребления и повышение автономности работы являются важными факторами при разработке таких устройств.

Интеграция с цифровыми системами и интернета вещей

Значимым направлением инноваций является интеграция датчиков ионизирующих излучений с цифровыми системами обработки данных и технологиями интернета вещей [2, 28–31]. Современные датчики оснащаются интерфейсами для передачи данных в реальном времени и могут быть включены в распределённые сети мониторинга. Это позволяет осуществлять централизованный сбор, хранение и анализ информации о радиационной обстановке. Применение интеллектуальных алгоритмов обработки данных способствует повышению эффективности мониторинга и расширяет возможности использования датчиков в автоматизированных системах управления и безопасности.

Новые материалы и нанотехнологии

Перспективным направлением развития датчиков ионизирующих излучений является применение новых материалов и нанотехнологий [3, 5, 16]. Использование наноструктурированных полупроводников, композитных и гибридных материалов позволяет улучшить чувствительность, радиационную стойкость и температурную стабильность детекторов. Нанотехнологические подходы способствуют созданию тонкоплёночных и гибких датчиков, а также повышению эффективности процессов преобразования энергии ионизирующего излучения в регистрируемый сигнал. Дальнейшие исследования в данной области направлены на оптимизацию свойств материалов и повышение производительности их характеристик.

Разработка multifunctional датчиков

Современные требования к системам радиационного контроля обуславливают необходимость разработки multifunctional датчиков, способных одновременно регистрировать различные виды ионизирующего излучения и определять их энергетические характеристики [1, 3]. Такие датчики обеспечивают расширение функциональных возможностей измерительных систем и снижение их общей сложности. Интеграция нескольких чувствительных элементов в одном устройстве позволяет повысить информативность измерений и адаптировать датчики к решению комплексных задач в медицине, промышленности и безопасности.

Возможности автоматизации и искусственного интеллекта

Перспективы развития датчиков ионизирующих излучений тесно связаны с внедрением средств автоматизации и методов искусственного интеллекта. Использование интеллектуальных алгоритмов обработки данных открывает возможности для автоматической классификации источников излучения, прогнозирования изменений радиационной обстановки и оптимизации режимов работы датчиков. Применение методов машинного обучения в сочетании с автоматизированными системами управления способствует повышению надёжности и эффективности радиационного мониторинга, а также снижению влияния человеческого фактора при принятии решений [2].

4. Проблемы и вызовы по датчикам ионизирующих излучений

4.1 Ограничения существующих технологий

Несмотря на значительный прогресс в области датчиков ионизирующих излучений, существующие технологии обладают рядом ограничений. К числу основных проблем

относятся ограниченная чувствительность отдельных типов детекторов, влияние внешних факторов на точность измерений, а также необходимость сложной калибровки. Для некоторых датчиков характерны узкие диапазоны рабочих энергий или зависимость характеристик от условий эксплуатации [1, 4]. Эти ограничения сдерживают универсальность применения датчиков и требуют дальнейшего совершенствования, как материалов, так и методов регистрации [19, 26].

#### 4.2 Стоимость и доступность

Важным вызовом является высокая стоимость отдельных типов датчиков и измерительных систем, особенно твердотельных и высокоточных сцинтилляционных детекторов. Существенные затраты связаны с производством высокочистых материалов, сложностью технологических процессов и необходимостью специализированного оборудования. Высокая стоимость ограничивает широкое внедрение современных датчиков, особенно в массовых и распределённых системах мониторинга. В связи с этим актуальной задачей остаётся разработка более доступных и экономически эффективных решений без существенного снижения измерительных характеристик.

#### 4.3 Надёжность и долговечность

Надёжность и долговечность датчиков ионизирующих излучений являются критически важными параметрами, особенно при эксплуатации в условиях повышенных радиационных нагрузок и неблагоприятных внешних воздействий. Длительное воздействие излучения может приводить к деградации чувствительных элементов и ухудшению метрологических характеристик [2, 6]. Кроме того, для портативных и автономных устройств актуальны проблемы механической прочности и стабильности работы в широком диапазоне температур. Решение данных задач требует комплексного подхода, включающего выбор устойчивых материалов, оптимизацию конструкций и внедрение методов самодиагностики.

### 4 Кластерный семантический анализ методов и средств регистрации ионизирующих излучений

#### 4.1 Методика кластерного семантического анализа

На рисунке 2 представлена семантическая карта взаимосвязей ключевых терминов, полученная в результате семантического анализа научных публикаций по тематике *ionizing radiation sensors*, выполненного с использованием ПО VOSviewer 1.6.20 на основе библиографических данных, экспортированных из базы Lens.org в формате CSV. Размер узлов на карте отражает частоту упоминания терминов, связи между ними – их семантическую связь, а пространственное расположение указывает на степень тематической близости исследовательских направлений.

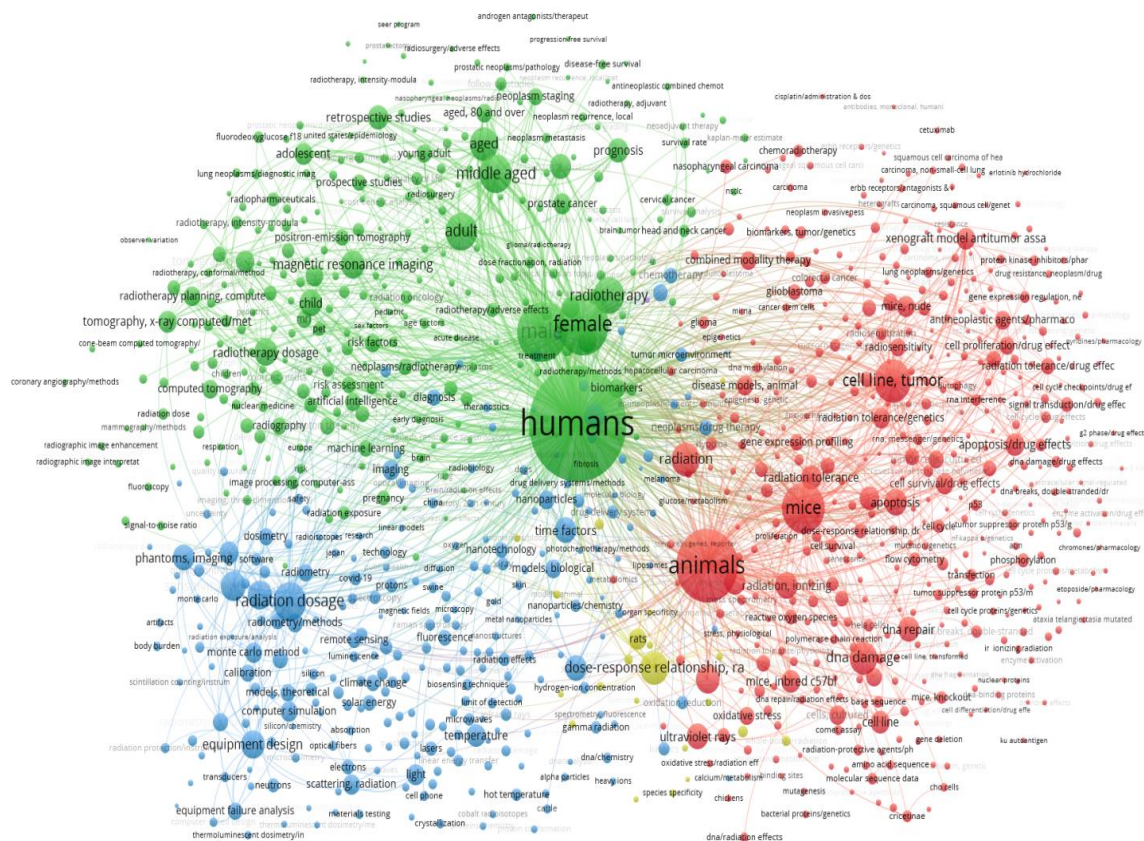


Рисунок 2 – Кластерный анализ источников литературы по датчикам ионизирующих излучений



В структуре карты выделяются три крупных кластера, отражающих основные инженерно-научные направления развития датчиков ионизирующих излучений.

#### 4.2 Кластер измерительных и дозиметрических технологий

Синий кластер объединяет термины, связанные с дозиметрией и измерительными системами, включая *radiation dosage*, *dosimetry*, *calibration*, *phantoms*, *Monte Carlo method* и *equipment design*. Данный кластер отражает фундаментальную инженерную основу области и связан с разработкой, калибровкой и метрологическим обеспечением датчиков ионизирующих излучений. Акцент на моделировании и численных методах указывает на возрастающую роль вычислительных технологий при проектировании и оптимизации чувствительных элементов и измерительных схем. Перспективными направлениями в рамках данного кластера являются повышение точности измерений, автоматизация процедур калибровки и внедрение цифровых моделей измерительных систем.

#### 4.2 Кластер прикладных медицинских технологий

Зелёный кластер характеризуется преобладанием терминов, связанных с применением датчиков ионизирующих излучений в медицинской технике, таких как *radiotherapy*, *magneticresonanceimaging*, *positron-emissiontomography*, *computedtomography* и *diagnosis*. С инженерной точки зрения данный кластер отражает требования к высокоточным и надёжным датчикам, используемым в системах медицинской визуализации и контроля доз облучения. Тесная связь этого кластера с дозиметрическим направлением подчёркивает актуальность разработки интегрированных датчиков, способных обеспечивать непрерывный мониторинг радиационного воздействия в реальном времени.

#### 4.3 Кластер радиобиологических и испытательных исследований

Красный кластер включает термины *cellline*, *DNA damage*, *radiation tolerance*, *oxidativestress* и *dose-response relation ship*, отражающие исследования воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты. В инженерном контексте данный кластер представляет собой экспериментальную базу для тестирования и валидации радиационных датчиков. Использование биологических моделей позволяет оценивать чувствительность, стабильность и пределы применимости измерительных устройств, что является важным этапом при разработке новых сенсорных технологий и материалов.

#### 4.4 Инженерная интерпретация и перспективы развития

Анализ кластерной структуры библиографических данных свидетельствует о смещении фокуса исследований в сторону комплексных и интеллектуальных измерительных систем. Ключевыми перспективными направлениями являются миниатюризация датчиков, интеграция с цифровыми системами обработки данных, а также применение методов машинного обучения для анализа измерительной информации. Наблюдаемая взаимосвязь между дозиметрическими, прикладными и экспериментальными кластерами подчёркивает необходимость междисциплинарного подхода при разработке современных датчиков ионизирующих излучений, ориентированных на повышение точности, надёжности и функциональности измерительных систем.

#### Заключение

В рамках данного обзора рассмотрено современное состояние исследований и разработок в области датчиков ионизирующих излучений. Проанализированы основные типы детекторов, применяемые материалы и конструктивные решения, а также области их практического использования. Показано, что развитие технологий регистрации ионизирующего излучения характеризуется ростом точности измерений, миниатюризацией устройств и активной интеграцией с цифровыми системами обработки данных. Обзор библиографических источников с применением кластерного анализа позволяет систематизировать существующие исследования, выделить ключевые тематические направления и выявить взаимосвязи между ними.

Перспективы дальнейших исследований в области датчиков ионизирующих излучений связаны с разработкой новых материалов и технологических подходов, обеспечивающих повышение чувствительности, надёжности и долговечности детекторов. Существенное внимание будет уделяться созданию мультифункциональных и интеллектуальных датчиков, способных адаптироваться к различным условиям эксплуатации и задачам мониторинга. Важным направлением остаётся развитие методов автоматизированной обработки данных, включая применение алгоритмов искусственного интеллекта для анализа измерительной информации. Использование кластерного анализа научных публикаций в дальнейшем может способствовать более глубокому пониманию тенденций развития данной области и формированию обоснованных направлений научных исследований.

Благодарности: Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSFN-2024-0086.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнорозок В. А. Детекторы ионизирующих излучений: учебное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 320 с.
2. Григорович В. А., Корчагин Ю. П. Радиационные измерения и дозиметрия: учебник для студентов технических вузов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 284 с.
3. Сафонов В. А., Ахметшин Р. А. Методы и средства регистрации ионизирующих излучений: учебное пособие. – М.: Физматлит, 2018. – 256 с.
4. Иванов В. Н. Физические основы дозиметрии и радиационных измерений. – М.: Атомиздат, 2010. – 312 с.
5. Васильев А. Н., Смирнов С. В. Сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 3–15.
6. ГОСТ 8.033-96 Государственная система обеспечения единства измерений. Дозиметры и радиометры ионизирующих излучений. Общие технические требования. – Введ. 1997-01-01. – М.: Госстандарт России, 1996.
7. ГОСТ 27451-87 Средства измерений ионизирующих излучений. Термины и определения. – Введ. 1988-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
8. Андреев Д. В., Курносенко А. Е., Макачук В. В., Соловьев В. А. Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения / [Д. В. Андреев и др.]. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – 387, [1] с.: ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 1).
9. Андреев В. В., Жалнин В. П., Столяров А. А. Физические основы микро- и нанoeлектроники. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. – 292, [2] с.: ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 3).
10. Власов А. И., Жалнин В. П., Селиванов К. В. Физико-химические основы приборостроения: учеб. пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – 531, [1] с.: ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 11).
11. Kuznetsov V.V., Andreev D.V., Andreev V.V., Piskunov S., Popov A.I. The Compact Model Synthesis for the RADFET Device // Technologies. 2025. Vol.13. N.492(1-18).
12. Ryzhov S., Kuznetsov V., Andreev V. Corner Simulation of CMOS Analog Integrated Circuit Taking into Account Radiation Influence // Micromachines. 2026. Vol.17. No.3. N.300(1-18).
13. Andreev D.V., Kornev S.A., Andreev V.V. Change in the Charge State of MOS Structures under Radiation and High-Field Injection at a Constant Voltage // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 2025, Vol.19. pp. 324-328.
14. Andreev K.A., Vlasov A.I., Shakhnov V.A. Silicon pressure transmitters with overload protection // Automation and Remote Control. 2016. Т. 77. № 7. С. 1281-1285.
15. Артемьев В. В., Власов А. И., Рукавишников К. А., Селиванов К. В. Энергоэффективные системы термоэлектрического термостатирования чувствительных элементов полупроводниковых радиационных датчиков // Датчики и системы. 2025. № 3 (281). С. 38-45.
16. Жалнин В. П., Семенов А. С., Вандюков А. Д. Современные тенденции развития полупроводниковых технологий // Технологии инженерных и информационных систем. 2022. № 1. С. 95-103.
17. Мительман М. Г., Розенблюм Н. Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. – М.: Энергоиздат, 1982. – 78 с.
18. Гулаков И. Р. Регистрация ионизирующих излучений: учебное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 2021. – 289 с.
19. Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 262 с.
20. Макаров В. И. Блоки детектирования ионизирующих излучений. – М., 1972. – 240 с.
21. Егоров Е. М., Жернов В. С., Лазарев А. Ф. и др. Аппаратура для регистрации и исследования ионизирующих излучений: справочник. – М.: Атомиздат, 1965. – 432 с.
22. ГОСТ 23077-78 Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Термины, определения и буквенные обозначения. – М.: Госстандарт СССР, 1979.
23. ГОСТ Р 71641-2024 Классификация детекторов ионизирующих излучений. – М.: Федеральное агентство, 2024.
24. Аглинцев К. К. Дозиметрия ионизирующих излучений. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957. – 504 с.
25. Семёнов В. С. Датчики тепловых величин. – М.: МИФИ, 1982. – 160 с.
26. Никифоров А. Ю., Согоян А. В., Бойченко Д. В. Электронные датчики: преобразователи ионизирующих излучений. – М.: МИФИ, 2005. – 196 с.
27. Андреев В. В., Жалнин В. П., Кузичкин О. Р. Стенд на основе платформы ARDUINO для снятия ВАХ полупроводниковых датчиков ионизирующих излучений // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2025. Т. 2. С. 198-203.
28. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2 (22). С. 26-35.
29. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K., Rasuk A., Smutka L. Predictive demand analytics and machine learning in electric power systems for enhancing resilience and efficiency // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2025. Т. 42. N. 101722.
30. Vlasov A.I., Echeistov V.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Migalin V.S. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Т. 16. № 4. С. 515-522.
31. Власов А. И., Волюнкина М. М., Широков Д. Е., Юдин А. В. Визуальные методы и средства системного проектирования интегрированного комплекса контроля и передачи полетной информации // Теория и реализация информационных систем. Сборник статей I международной научной конференции. Москва, 2025. С. 89-92.



УДК 534.2:534.41

**Гришко<sup>1</sup> А.К., Морозов<sup>2</sup> И.А., Еникеев<sup>3</sup> А.Р., Зайцев<sup>4</sup> Е.И., Шмелев<sup>5</sup> К.В.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> alexey-grishko@rambler.ru

<sup>2</sup> vanka.morozkin@mail.ru

<sup>3</sup> amoran5005@mail.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕРНИЗАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Аннотация.** Рассматриваются теоретические и практические аспекты модернизации акустических систем. Подробно анализируются существующие подходы, их преимущества и недостатки, а также методы повышения качества звучания. Особое внимание уделяется цифровой обработке сигналов, измерениям характеристик и их корректировке. Приводятся пояснения процессов повышения качества звучания с инженерной точки зрения и субъективного слушателя.

**Ключевые слова:** акустическая система, кроссовер, эквалаизация, фильтрация

**Grishko<sup>1</sup> A.K., Morozov<sup>2</sup> I.A., Yenikeev<sup>3</sup> A.R., Zaytsev<sup>4</sup> E.I., Shmelev<sup>5</sup> K.V.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> alexey-grishko@rambler.ru

<sup>2</sup> vanka.morozkin@mail.ru

<sup>3</sup> amoran5005@mail.ru

## THEORETICAL AND PRACTICAL METHODS OF UPGRADING ACOUSTIC SYSTEMS

**Abstract.** Theoretical and practical aspects of modernization of acoustic systems are considered. Existing approaches, their advantages and disadvantages, as well as methods for improving sound quality are analyzed in detail. Particular attention is paid to digital signal processing, measurements of characteristics and their correction. The processes of sound quality improvement from an engineering point of view and a subjective listener are explained.

**Keywords:** acoustic system, crossover, equalization, filtration

Пассивные акустические системы широко применяются благодаря простоте конструкции и надёжности. Однако их функциональные возможности ограничены, особенно в части точной настройки частотных и временных характеристик. Помимо стандартных методик настройки, субъективная экспертиза является обязательной процедурой оценки для всех звеньев звукозаписывающих и звуковоспроизводящих трактов (от студийного микрофона до бытовой акустической системы). Это обусловлено тем, что используемый в настоящее время набор объективных параметров: воспроизводимый диапазон частот, неравномерность АЧХ, уровень нелинейных искажений и др. неоднозначно определяет «слуховой образ», воспринимаемый слушателем [1–3].

Современные требования к качеству звука предполагают возможность адаптации системы под конкретные условия эксплуатации, включая помещение и расположение слушателя. Несмотря на интенсивные научные исследования, проводимые во многих странах на протяжении длительного периода времени, проблема полной расшифровки «слухового образа» еще не решена полностью. Именно этим объясняется достаточно широко распространенное явление, когда, например, два студийных акустических агрегата, имеющие близкие объективные характеристики, могут значительно различаться по качеству звучания. Поэтому результаты как объективной оценки, так и субъективной экспертизы служат главным критерием оценки уровня аппаратуры различных фирм-производителей [3–5]. Это делает актуальным применение цифровых методов обработки сигналов.

Целью работы является модернизация пассивной акустической системы путём внедрения цифрового кроссовера на базе DSP с последующим исследованием амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), фазо-частотной характеристики (ФЧХ), а также настройкой временных задержек между динамиками.

Процесс оценки качества звучания всех видов звуковой аппаратуры является процедурой субъективной, результаты которой существенно зависят от многих факторов: параметров помещения прослушивания, выбора текстовых программ, отбора и методов тренировки экспертов, методов выбора оценок и обработки результатов, требований к источникам программ и т.д. Вопросам разработки методик организации и проведения субъективных экспертиз уделяется в научно-технической литературе большое внимание [3, 6–9]. В целях повышения достоверности результатов, полученных различными фирмами, и возможности сравнения из между собой в таких авторитетных международных организациях как IEC (Международный Электротехнический Комитет – МЭК), AES (Общество аудио-инженеров), ICO и др. созданы специальные рабочие группы, которые занимаются разработкой рекомендаций по организации субъективных экспертиз, на основе которых разработаны национальные стандарты в большинстве стран-производителей (США, Япония, Германия и т.п.). Основными документами, используемыми при организации субъективных экспертиз в нашей стране

является [1,2], которые определяют требования: к условиям прослушивания (помещение, порядок отбора и размещение образцов и слушателей, параметры звуковоспроизводящего тракта и т.д.); к процедуре тестирования (выбор программного материала, методы оценки, порядок прослушивания, интерпретация полученных результатов); к подбору экспертов (проверка слуховых порогов, опыта прослушивания, способов тренировки и т.д.); к видам оценочных таблиц и способам статистической обработки результатов. Стандарты устанавливают методы экспертной оценки как при разработках, так и при приемочных, квалификационных, аттестационных, периодических и типовых испытаниях промышленной продукции [3, 10–12].

Анализ пассивных акустических систем

Пассивный кроссовер выполняет разделение входного сигнала на частотные полосы с помощью аналоговых компонентов: индуктивностей, конденсаторов и резисторов.

Основные недостатки:

- фиксированные параметры фильтрации
- невозможность оперативной настройки
- потери мощности на элементах
- фазовые искажения в области раздела

Кроме того, пассивные фильтры не позволяют учитывать влияние помещения и временные рассогласования между динамиками.

Цифровые кроссоверы и DSP

Цифровой кроссовер реализует разделение сигнала в цифровой форме до усиления.

Основные функции DSP:

- фильтрация сигнала
- введение временных задержек
- эквалаизация
- коррекция фазовых характеристик

Используются фильтры:

- *IIR* — эффективные по вычислениям
- *FIR* — обеспечивают линейную фазу

Главное преимущество — возможность гибкой настройки без изменения аппаратной части.

Проектирование системы

Структура системы:

- источник сигнала
- DSP
- многоканальный усилитель
- динамики

Пассивный кроссовер исключается, и каждый динамик подключается к отдельному усилителю.

На этапе проектирования:

- выбираются частоты раздела
- задаётся тип фильтров (например, *Linkwitz-Riley* 4-го порядка)
- определяется конфигурация системы

Настройка временных задержек

Динамики в системе расположены на разной глубине, что приводит к различному времени прихода сигнала к слушателю.

Даже небольшие задержки вызывают:

- ухудшение суммирования сигналов
- искажения в области кроссовера
- снижение точности звуковой сцены

Методика:

1. Измеряется импульсная характеристика
2. Определяется разница времени прихода
3. В DSP вводится задержка для компенсации

Результат — выравнивание фронта сигнала и улучшение согласования полос.

Исследование АЧХ

АЧХ отражает зависимость уровня звукового давления от частоты.

Измерение выполняется:

- с использованием измерительного микрофона
- в контрольной точке

Типичные проблемы:

- резонансные пики
- провалы из-за интерференции

Коррекция осуществляется с помощью параметрического эквалайзера.

Важно:

коррекция должна быть умеренной, так как чрезмерная обработка ухудшает качество сигнала.

Исследование ФЧХ

ФЧХ показывает зависимость фазы сигнала от частоты.

Проблемы:

- несогласованность фаз между динамиками
- фазовые сдвиги в фильтрах

Последствия:

- искажение формы сигнала
- ухудшение импульсной характеристики

Решения:

- введение задержек
- использование фильтров с контролируемой фазой

В некоторых случаях применяются *FIR*-фильтры для получения линейной фазы.

Коррекция под помещение

Помещение оказывает значительное влияние на звук:

Основные факторы:

- отражения от стен
- стоячие волны
- моды помещения

Методика:

1. Измерение АЧХ в точке прослушивания
2. Определение проблемных частот
3. Применение корректирующих фильтров

Ограничение:

невозможно полностью компенсировать акустику помещения, но можно существенно улучшить восприятие.

Экспериментальная часть

Проводится сравнение:

- исходной системы
- модернизированной системы

Оцениваются:

- АЧХ
- ФЧХ
- временные характеристики

Результаты показывают:

- улучшение линейности АЧХ
- снижение фазовых искажений
- улучшение согласования динамиков

Заключение

В ходе работы была проведена всесторонняя теоретическая и практическая оценка возможностей модернизации пассивной акустической системы с использованием цифрового кроссовера на базе SigmaDSP (ADAU). Проанализированы существующие подходы к построению акустических систем, выявлены их сильные стороны и ограничения, что подтвердило необходимость внедрения цифровой обработки сигналов для повышения качества воспроизведения.

Реализация цифрового кроссовера позволила:

- гибко управлять частотными характеристиками системы;
- корректировать фазовые и временные рассогласования между динамиками;
- проводить эквализацию АЧХ с учётом особенностей помещения и расположения слушателя.

Проведенные измерения и анализ показали, что цифровая модернизация обеспечивает значительное улучшение линейности АЧХ и согласования ФЧХ, снижает искажения и повышает точность воспроизведения звука. Настройка временных задержек между динамиками способствовала более корректному суммированию сигналов и формированию чёткой звуковой сцены.

Таким образом, цель работы — повышение функциональности и качества акустической системы за счёт внедрения цифрового кроссовера на базе *DSP* — была успешно достигнута. Полученные результаты подтверждают практическую эффективность применения цифровых методов обработки сигналов в акустике и открывают возможности для дальнейшего совершенствования систем воспроизведения звука, включая адаптацию под специфические условия эксплуатации и расширение функционала современных аудиосистем.

Подводя итоги приведенных выше требований, следует отметить, что организация объективных и субъективных экспертиз, включая выбор: экспертов, акустики комнат

прослушивания, подбор текстовых программ и методов их оценки, является чрезвычайно сложной процедурой, требующей тщательной подготовки. Однако именно такая подготовка может обеспечить достоверность и стабильность результатов. Как показывает многолетний мировой опыт выпуска студийных контрольных агрегатов, аппаратуры Hi-Fi и High-End, от качества организации субъективных экспертиз в очень значительной степени зависит уровень выпускаемой фирмой аппаратуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эверест Ф. Алтон, Польман Кен К.. Справочник по акустике (*Master Handbook of Acoustics*). – McGraw-Hill, 2015.
2. Селф Дуглас. Справочник по проектированию аудиотехники и усилителей (*Audio Power Amplifier Design Handbook*). – Routledge, 2013.
3. Гришко, А. К. Методы субъективной оценки качества звучания электроакустических систем / А. К. Гришко, М. В. Бойцова // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2006. – Т. 2. – С. 141-143. – EDN NDWQLT
4. Смит Стивен В. Руководство по цифровой обработке сигналов для инженеров и учёных (*The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*). – California Technical Publishing, 1997.
5. Intellectual Method for Reliability Assessment of Radio-Electronic Means / N. K. Yurkov, A. K. Grishko, A. V. Lysenko [et al.] // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018, Saratov, 27-28 сентября 2018 года. – Saratov: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 105-112. – DOI 10.1109/APEDE.2018.8542360. – EDN WUCKOJ.
6. Гришко, А. К. Динамическая обработка сигнала в системах управления процессом аудиозаписи / А. К. Гришко // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2007. – Т. 2. – С. 56-59. – EDN NDUPIF.
7. Гришко, А. К. Оптимальное управление частотным ресурсом радиотехнических систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 57. – С. 21-28. – DOI 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28. – EDN XBFCQR.
8. Гришко, А. К. Марковская модель прогнозирования параметрической надежности радиоэлектронных систем / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2(28). – С. 5-12. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-1. – EDN BECAHS.
9. Гришко, А. К. Методика оценки интенсивности интерференции в радиоэлектронных системах на основе геоинформационного подхода / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1(19). – С. 45-49. – EDN YMEUJF.
10. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4(16). – С. 26-34. – DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-4. – EDN YFSZCZ.
11. Imitation modelling for the subsystem of identification and structuring data of signal sensors / M. Y. Mikheev, T. V. Zhashkova, E. N. Meshcheryakova [et al.] // Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016, Yerevan, 14-17 октября 2016 года. – Yerevan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. – P. 7807748. – DOI 10.1109/EWDTS.2016.7807748. – EDN YVGBZH.
12. Гришко, А. К. Марковская модель прогнозирования параметрической надежности радиоэлектронных систем / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2(28). – С. 5-12. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-1. – EDN BECAHS.
13. Grishko, A. K. Control algorithm for decision making in multi-criteria optimization problems / A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2388, No. 1. – P. 012035. – DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012035. – EDN FZEIYN.
14. Гришко, А. К. Геопространственный анализ электромагнитных полей в радиоэлектронных системах с учетом отражений / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2(22). – С. 163-169. – EDN ZBQAYN.
15. К проблеме развития математических методов комплексного моделирования технологических систем / Л. В. Логонова, Н. К. Юрков, И. М. Рыбаков [и др.] // Надежность и качество сложных систем. – 2025. – № 4(52). – С. 45-56. – DOI 10.21685/2307-4205-2025-4-6. – EDN YSGCTS.

УДК 621.382

**Медведев<sup>1</sup> С.С., Кочеткова<sup>2</sup> К.Д., Кравчук<sup>3</sup> А.Д., Фролов<sup>4</sup> Н.Ю., Темиргали<sup>5</sup> А.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> smed182002@gmail.com

<sup>2</sup> kochetkova504@mail.ru

<sup>3</sup> kravhykanna97@gmail.com

<sup>4</sup> frolovn31804@mail.ru

<sup>5</sup> kipra@mail.ru

## **ТЕНДЕНЦИИ МИНИАТЮРИЗАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ**

**Аннотация.** Рассмотрены современные тенденции миниатюризации радиоэлектронных устройств, проанализированы технологические и конструктивные трудности, возникающие при уменьшении габаритов компонентов, а также предложены пути их решения. Особое внимание уделено влиянию миниатюризации на тепловые режимы, электромагнитную совместимость и надёжность устройств. Отмечены перспективы применения новых материалов, аддитивных технологий и цифровых методов проектирования при создании компактной радиоаппаратуры.

**Ключевые слова:** миниатюризация, радиоэлектронные устройства, печатные платы, тепловые режимы, надёжность, микромонтаж, SMD-технология

**Medvedev<sup>1</sup> S.S., Kochetkova<sup>2</sup> K.D., Kravchuk<sup>3</sup> A.D., Frolov<sup>4</sup> N.Yu., Temirgali<sup>5</sup> A.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> smed182002@gmail.com

<sup>2</sup> kochetkova504@mail.ru

<sup>3</sup> kravhykanna97@gmail.com

<sup>4</sup> frolovn31804@mail.ru

<sup>5</sup> kipra@mail.ru

## **TENDENCIES OF MINIATURIZATION OF RADIOELECTRONIC DEVICES: PROBLEMS AND SOLUTIONS**

**Abstract.** The article discusses current trends in the miniaturization of radio-electronic devices, analyzes technological and design difficulties that arise when reducing the dimensions of components, and proposes ways to solve them. Special attention is paid to the impact of miniaturization on thermal conditions, electromagnetic compatibility, and reliability of devices. The article highlights the prospects for using new materials, additive technologies, and digital design methods in the creation of compact radio equipment.

**Keywords:** miniaturization, radio-electronic devices, printed circuit boards, thermal conditions, reliability, micro-mounting, SMD technology

Современное развитие радиоэлектроники неразрывно связано с процессом миниатюризации [1–3]. Стремление к созданию более компактных, легких и функциональных устройств определяет прогресс не только в потребительской электронике, но и в таких областях, как оборонная промышленность, медицина и аэрокосмическая техника. Уменьшение габаритов систем способствует повышению их мобильности, энергоэффективности и быстродействия, однако одновременно порождает целый ряд инженерных задач [4–6].

Рост плотности размещения компонентов приводит к увеличению тепловых нагрузок, усложнению трассировки печатных плат, усилению электромагнитных помех и снижению ремонтпригодности [7, 8]. Решение этих проблем требует комплексного подхода, сочетающего прогресс в области материалов, технологий сборки и методов проектирования.

Одной из ключевых задач при миниатюризации является обеспечение стабильного теплового режима. С уменьшением размеров устройств площадь теплоотвода сокращается, в то время как плотность выделяемой мощности часто остается прежней или даже возрастает. Это вызывает локальный перегрев микросхем, что отрицательно сказывается на сроке их службы и надежности [9, 10].

Кроме того, высокая плотность монтажа увеличивает риск электромагнитных связей между цепями, ухудшая электромагнитную совместимость. В высокочастотных схемах даже незначительные паразитные емкости и индуктивности могут исказить форму сигнала, поэтому особое значение приобретают тщательная компоновка и экранирование.

Процессы сборки и ремонта миниатюрных устройств становятся всё более сложными. Компоненты в корпусах SMD, BGA и CSP требуют высокой точности установки и строго контролируемых режимов пайки. Это делает ручной ремонт практически невозможным, что усложняет обслуживание таких изделий в эксплуатации.

Миниатюрные конструкции также более уязвимы к механическим воздействиям [11–13]. Микроэлементы чувствительны к вибрациям, ударам и перепадам температуры, что может привести к разрушению соединений и ухудшению характеристик устройства. Поэтому важное значение приобретают новые конструктивные решения и методы защиты, повышающие механическую стойкость и долговечность.

Для преодоления указанных трудностей активно разрабатываются новые материалы и технологические подходы. Перспективными считаются керамические и композитные подложки с высокой теплопроводностью, которые улучшают теплоотвод и повышают термостабильность. Повсеместное внедрение поверхностного монтажа (SMT) позволило значительно уменьшить размеры и массу изделий, сократить длину соединений и повысить электрические характеристики.

Использование многослойных и гибридных печатных плат с технологией HDI (*High Density Interconnect*) обеспечивает возможность компоновки сложных схем в ограниченном пространстве – особенно важно для мобильных и встроенных систем. Аддитивные технологии, включая 3D-печать корпусов и охлаждающих структур, открывают новые возможности для создания легких конструкций со специально оптимизированной геометрией.

Компьютерное моделирование и технологии «цифровых двойников» становятся неотъемлемой частью современного проектирования. Они позволяют прогнозировать тепловое поведение устройств, оценивать распределение температуры и оптимизировать конструкцию ещё до этапа прототипирования. Это значительно сокращает сроки разработки и снижает количество производственных ошибок.

Дальнейшее развитие миниатюризации связано с использованием систем-на-кристалле (SoC), трёхмерных интегральных схем (3D IC) и нанотехнологий. Большие перспективы демонстрируют материалы на основе графена и углеродных нанотрубок, обладающие уникальными электрическими и механическими свойствами.

Широкое применение получает технология *System-in-Package (SiP)*, которая позволяет объединять несколько функциональных модулей в одном компактном корпусе, обеспечивая высокую производительность и надежность.

Миниатюризация остается одним из ключевых направлений развития современной электроники. Несмотря на серьезные тепловые, электрические и механические сложности, применение новых материалов, аддитивных технологий и цифровых инструментов проектирования позволяет успешно решать возникающие задачи.

Будущее развитие отрасли зависит от комплексного подхода, объединяющего тепловое моделирование, высокоточные технологии сборки и интеллектуальные системы мониторинга. Эти инновации открывают путь к созданию нового поколения компактных, надежных и энергоэффективных радиоэлектронных устройств, отвечающих требованиям современного производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынов А. В., Миниатюризация радиоэлектронных систем: проблемы и решения / А. В. Мартынов, В. Н. Литвинов // Радиотехника. – 2021. – № 3. – С. 12-20.
2. Лысенко, А. В. Анализ современных систем управления проектами / А. В. Лысенко // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2012. – Т. 1. – С. 371-372. – EDN PCBXZN.
3. Yurkov, N. K. Methods of Providing Reliability of Avionics and Aerospace Equipment at the Design Stage / N. K. Yurkov, V. A. Trusov, A. V. LySENko // 13th international scientifictechnical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE - 2016) : Proceedings: in 12 volumes, Novosibirsk, 03-06 октября 2016 года. Vol. Volume 1, Part 2. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – P. 123-127. – DOI 10.1109/APEIE.2016.7806427. – EDN WZWMUD.
4. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems / A. Grishko, A. LySENko, N. Yurkov [et al.] // Proceedings - 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019, Yekaterinburg, 25-26 апреля 2019 года. – Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 432-435. – DOI 10.1109/USBREIT.2019.8736570. – EDN MUDDKI.
5. Лебедев И. П., Современные материалы для печатных плат высокой плотности монтажа / И. П. Лебедев, А. В. Синицын // Вестник радиотехники. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 45-50.
6. Лысенко, А. В. Конструкция активного виброамортизатора с электромагнитной компенсацией / А. В. Лысенко, Д. В. Ольхов, А. В. Затылкин // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2013. – № 1. – С. 454-456. – EDN BVKKQF.
7. Гусев А. А. Тепловые режимы в микроэлектронных устройствах / А. А. Гусев // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2020. – № 5. – С. 32-38.
8. Стенд исследования тепловых полей элементовконструкций РЭС / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко [и др.] // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2008. – Т. 2. – С. 162-166. – EDN LVLNZN.
9. Программа инженерного расчёта температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2012. – Т. 1. – С. 340. – EDN PCBXUD.
10. Алгоритм функционирования стенда исследования теплоотводов и систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2011. – № 1. – С. 385-391. – EDN PEVEEL.
11. Кузнецов Д. А., Аддитивные технологии в производстве электронных устройств / Д. А. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2022. – № 2. – С. 15-22.
12. Лысенко, А. В. Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2013. – Т. 2. – С. 155-158. – EDN RUAITZ.
13. Лысенко, А. В. Анализ современных методов вибрационной защиты радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Современные информационные технологии. 2014. № 19. С. 135-142.

УДК 621.396.6

**Юрков<sup>1</sup> Н.К. , Морозов<sup>2</sup> В.В.**

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

### **ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СПОСОБОМ НАНЕСЕНИЯ ВЛАГОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

**Аннотация.** Рассматривается проблема использования влагозащитных покрытий для повышения надежности печатных узлов. Отмечается, что для эффективного использования покрытий необходимо учитывать ряд факторов. Дана характеристика основным видам влагозащитных покрытий, используемых в радиоэлектронной аппаратуре, определены показатели их эффективности: условия отверждения, рабочие температуры, ТКЛР (коэффициент линейного расширения), диэлектрическая проницаемость, влагостойкость. Дан анализ разных подходов и методов для расчета надежности влагозащитных покрытий для печатных плат. В рамках определения последовательности расчёта надежности выделены факторы, влияющие на надежность, обозначены основные методы и этапы проведения расчетов, основные типовые расчеты и показатели надежности: среднее время наработки на отказ, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, расчет срока службы, оценка критичности потенциальных дефектов. Рассмотрены подходы и модели, основанные на физических принципах и статистических закономерностях, которые позволяют количественно оценивать те или иные аспекты надежности покрытий печатных узлов.

**Ключевые слова:** радиоэлектронная аппаратура, влагозащитные покрытия, надежность адгезии, коррозия, прогнозирование, условия эксплуатации

**Yurkov<sup>1</sup> N.K. , Morozov<sup>2</sup> V.V.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Penza Research Institute of Electrical Engineering, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

### **PROBLEM OF IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF PRINTING UNITS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT FOR APPLICATION OF MOISTURE-PROOF COATINGS**

**Abstract.** The article is devoted to the problem of using waterproof coatings to improve the reliability of printing units. It is noted that for the effective use of coatings, it is necessary to take into account a number of factors. Characteristics of the main types of moisture protective coatings used in radioelectronic equipment are given, their efficiency indicators are determined: curing conditions, operating temperatures, TCLR (linear expansion coefficient), dielectric constant, moisture content. Analysis of various approaches and methods for calculating the reliability of waterproof coatings for printed circuit boards is given. As part of determining the reliability calculation sequence, factors affecting reliability are identified, the main methods and stages of calculations, the main standard calculations and reliability indicators are indicated: MTBF, probability of failure-free operation, failure rate, service life calculation, assessment of the criticality of potential defects. The article discusses approaches and models based on physical principles and statistical regularities, which make it possible to quantify certain aspects of the reliability of printing unit coatings.

**Keywords:** radio-electronic equipment, moisture-proof coatings, reliability of adhesion, corrosion, forecasting, operating conditions

При производстве радиоэлектронной аппаратуры большое внимание уделяется прогнозированию стабильной работы печатных узлов. Одним из методов, способствующих повышению их надежности, является нанесение на элементы печатных плат влагозащитных покрытий, которые образуют тонкий защитный слой на печатной плате и её элементах, уменьшают риск коррозии, коротких замыканий и сбоев при воздействии влажности, конденсации, химических факторов и экстремальных температур. Вопросы использования влагозащитных покрытий в производстве радиоэлектронной аппаратуры фрагментарно затронуты в работах отдельных исследователей [1, 2, 3, 4].

При выборе влагозащитного покрытия для печатных плат необходимо учитывать ряд факторов: **условия эксплуатации** (температуру, влажность, наличие агрессивных химических веществ, вибрации, механические нагрузки); **требования к надежности (в условиях экстремальных нагрузок)** требуются более надежные и долговечные покрытия; **электропроводность покрытия** (требования к диэлектрической прочности, учет тангенса угла диэлектрических потерь, который характеризует уровень потерь энергии в изоляционном материале при воздействии переменного электрического поля); **термостойкость** (способность покрытия выдерживать температуры эксплуатации); экономическая целесообразность выбора покрытия; доступность **технологии нанесения**.

Влагозащитные покрытия выполняют ряд функций:

– предотвращают коррозию. Влага, взаимодействуя с металлическими проводниками и контактными площадками, вызывает электрохимическую коррозию. Это приводит к увеличению сопротивления, обрывам цепей и, как следствие, к нарушению функционирования платы;

- уменьшают риск возникновения **коротких замыканий** между близко расположенными проводниками, влага может вызвать короткие замыкания, которые моментально выводят из строя компоненты;

- обеспечивают изоляцию, механическую защиту и химическую стойкость.

В производстве радиоэлектронной аппаратуры используют разные виды влагозащитных покрытий, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками, а также предназначен для конкретных условий эксплуатации. Самыми распространенными в производстве являются акриловые, уретановые, силиконовые и эпоксидные.

Акриловые покрытия обладают хорошими электроизоляционными свойствами. Кроме того разные материалы, созданные на базе акрила отличаются хорошей прочностью, стойкостью к нагреву, влагостойкостью, высокими диэлектрическими характеристиками. При обработке компонентов печатных узлов обычно наносят два или три слоя покрытия для обеспечения более надежной защиты.

Полиакриловые материалы на основе растворов термопластичных полимеров служат для приготовления лаков и клея. В основном это покрытия естественной сушки. В работе Чуйковой Л. отмечается, что «Полиакриловые лаки на основе термореактивных полимеров (акриловые полимеры и сополимеры) обладают высокой атмосферо- и светостойкостью, ударпрочностью, эластичны, имеют высокую адгезию» [5, с. 165]. Акриловые покрытия служат для изготовления паяльных масок, которые затвердевают под воздействием УФ-света и используются для защиты печатных узлов от окисления и коротких замыканий. Такие покрытия широко применяются в производстве радиоэлектронной аппаратуры. Значительным преимуществом акриловых материалов является диапазон температур их применения:  $-60...+135$  °С. Покрытия ремонтпригодны, легко удаляются нагреванием до  $150$  °С. Однако они имеют избирательную химическую стойкость и требуют для разных условий и изделий разное время сушки на воздухе, имеют большую усадку при испарении растворителя.

Полиуретановые покрытия применяются там, где требуется низкая влаго- и газопроницаемость и сопротивление истиранию. Имеют хорошую химическую стойкость, атмосферостойкость и высокие температурные показатели. Наибольшее применение получили гетероцепные полимеры, содержащие незамещенные или замещенные уретановые группы – полиуретаны. Диапазон рабочих температур уретановых покрытий  $-60...+120$  °С. Покрытия ремонтпригодны. Тонкие покрытия можно паять насквозь очень горячим ( $420$  °С) паяльником или удалять механически. Поддаются восстановлению после ремонта.

Силиконовые покрытия или кремнийорганические полимеры имеют высокую термо-, свето- и атмосферостойкость, высокую гидрофобность и электрические свойства, обеспечивают высокие температурные, диэлектрические показатели. Но в ходе тестирования режима работы в условно влажной среде показывают результат в 10–20 раз хуже по сравнению с другими покрытиями. Один из серьезных недостатков этого покрытия – относительно большой коэффициент температурного линейного расширения, который может приводить к отрыву компонентов и проводников. Также такие покрытия обладают более высокой миграцией легких молекул, требуют дополнительной подготовки поверхности; несовместимы с определенными компонентами.

При нанесении влагозащитных покрытий на печатные узлы радиоэлектронной аппаратуры широко применяются материалы на основе эпоксидных смол. Они обладают хорошей адгезией, высокой твердостью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами. Используются в заливочных компаундах и в качестве полимерной основы влагозащитных покрытий. Эпоксидная смола или олигомер под действием отвердителей превращается в полимер. Процесс отверждения полимеров сопровождается объемными усадками и возникновением усадочных напряжений. Эпоксидные смолы обладают минимальной химической усадкой.

Для получения более надежного покрытия рекомендуется двухслойное или многослойное покрытие, способствующее перекрытию возможных дефектов (поры, раковины). При нарушении технологии нанесения этого покрытия возможно появление «пузырьковой сыпи», которую необходимо устранить, соблюдая инструкцию.

Диапазон рабочих температур этих покрытий составляет  $-40...+150$  °С.

Покрытия ремонтпригодны. Тонкие покрытия можно паять насквозь, легко удалять механически. Поддается восстановлению после ремонта за счет процессов холодного отверждения.

Сравнительные данные рассмотренных влагозащитных покрытий представлены в таблице 1.

В производстве РЗА также используются париленовые покрытия, которые обладают рядом преимуществ: уникальной нано- или микрометрической толщиной, хорошей линейной конформальностью, отсутствием «пинголов» и превосходной влагозащитой;



отличной химической стойкостью и высоким уровнем изоляции. К недостаткам относят более сложный и дорогостоящий процесс нанесения (посредством химического вакуумного напыления), наличие специализированного оборудования.

Сравнение свойств покрытий

Таблица 1

| Свойства                            | Силиконовые                      | Акриловые                         | Уретановые                   | Эпоксидные                   |
|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Условия отверждения                 | 2–24 ч при КТ, 30 мин при 230 °С | 12–24 ч при КТ, 0,5–2 ч при 40 °С | 8–24 ч при КТ, 8 ч при 80 °С | 9–10 ч при КТ, 2 ч при 65 °С |
| Площадь покрытия, гр/м <sup>2</sup> | 40–80                            | 100–160                           | 80–140                       | 180–200                      |
| Рабочие температуры                 | –65...+200                       | –60...+135                        | –60...+120                   | –40...+150                   |
| ТКЛР (коэф. линейного расширения)   | $7,5 \times 10^{-5}$             | $16 \times 10^{-5}$               | $15 \times 10^{-5}$          | $9,2 \times 10^{-5}$         |
| Диэлектрическая проницаемость       | 2,5                              | 2,5                               | 3,6                          | 4,2                          |
| Влагостойкость                      | отличная                         | хорошая                           | отличная                     | отличная                     |

Одним из самых технологичных решений последних лет стало фторполимерное покрытие Novac 1700. Оно образует на поверхности платы слой толщиной всего 1 мкм, который обладает выраженными водоотталкивающими и маслоотталкивающими свойствами. Покрытие не требует маскирования разъемов, быстро сохнет (до 10 секунд), а процесс нанесения может быть как ручным, так и автоматизированным. Покрытие устойчиво к перепадам температур (от –73 до +260 °С), не содержит летучих органических соединений и безопасно для окружающей среды. Однако стоит помнить, что это покрытие не обеспечивает механической защиты и не предназначено для работы в условиях сильных механических нагрузок.

При выборе влагозащитного покрытия для печатных плат необходимо учитывать также требования к ремонтнопригодности и возможности повторной пайки, экологические и санитарные нормы, способ нанесения.

Самым распространенным методом нанесения для акриловых, силиконовых и уретановых покрытий является распыление. Этот метод позволяет быстро и равномерно покрывать большие площади. Для сложных конфигураций наиболее приемлем метод погружения. Кисть используется для локального нанесения покрытий, например, при с определенным участком платы. При автоматизированном нанесении роботизированные системы с высокой точностью наносят покрытие только на необходимые участки.

Расчет надежности влагозащитных покрытий для печатных плат – это сложный процесс, включающий оценку различных факторов, влияющих на долговечность и работоспособность покрытия в условиях воздействия агрессивных сред. Приведем основные подходы и методы, используемые для таких расчетов.

#### 1. Анализ факторов, влияющих на надежность.

##### Свойства покрытия

1. **Водопоглощение** – способность материала покрытия поглощать влагу из окружающей среды. Чем ниже водопоглощение, тем выше надежность печатного узла.

2. **Диэлектрическая проницаемость** – влияет на электрические свойства покрытия. Влага может изменить диэлектрическую проницаемость, что приведет к утечкам тока.

3. **Адгезия** характеризует сцепление покрытия с поверхностью печатной платы. Слабая адгезия может привести к отслаиванию покрытия и проникновению влаги.

4. **Прочность и эластичность** – покрытия должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать механические нагрузки, но при этом эластичными, чтобы компенсировать температурные расширения/сжатия платы.

5. **Химическая стойкость** – устойчивость к воздействию химических веществ, которые могут присутствовать в среде эксплуатации.

6. **Термостойкость** – способность сохранять свои свойства при различных температурах.

##### Условия эксплуатации

1. **Уровень влажности** – процентное содержание водяного пара в воздухе.

2. **Температурные перепады** – циклическое изменение температуры, вызывающее конденсацию влаги.

3. **Наличие агрессивных сред** – соли, кислоты, щелочи, промышленные загрязнители.

4. **Механические воздействия** – вибрация, удары.

### **Конструкция печатной платы**

1. **Плотность монтажа** – наличие мелких компонентов и плотное расположение элементов могут создавать «карманы» для сбора влаги.
  2. **Материал основания печатной платы** – FR-4, алюминий и др.
  3. **Тип компонентов** – чувствительность компонентов к влаге.
  4. **Наличие зазоров и щелей** – места, где влага может проникнуть под покрытие.
- II. Основные методы расчета надежности.**

### **Статистические методы**

1. **Анализ распределений** – изучение распределения отказов во времени. Может использоваться для построения моделей жизненного цикла покрытия.
2. **Метод максимального правдоподобия** – оценка параметров моделей надежности на основе экспериментальных данных.
3. **Метод Монте-Карло** – моделирование случайных процессов, влияющих на надежность для оценки вероятности отказа.

### **Физико-математическое моделирование**

1. **Модели диффузии влаги** – расчет скорости проникновения влаги в покрытие и под него.
2. **Модели электрохимической коррозии** – оценка скорости коррозии проводящих элементов платы под воздействием влаги и электролитов.
3. **Модели теплопереноса и конденсации** – определение зон, где возможна конденсация влаги при температурных перепадах.
4. **Метод конечных элементов** – наиболее мощный инструмент для моделирования напряженно-деформированного состояния покрытия и платы под воздействием температуры, влажности и механических нагрузок. Позволяет выявить потенциальные зоны разрушения.

### **Экспериментальные методы**

1. **Испытания на ускоренное старение** – создание максимально приближенных к реальным (усиленным) условий эксплуатации для сокращения времени оценки надежности.
2. **Климатические испытания** – постоянная и циклическая влажность, температурные перепады, соляной туман.
3. **Испытания на адгезию** – методы отрыва, сдвига.
4. **Электрические испытания** – измерение сопротивления изоляции, диэлектрической прочности.
5. **Визуальный осмотр и микроскопия** – выявление дефектов покрытия, признаков коррозии, отслоений.
6. **Методы неразрушающего контроля** – ультразвуковой контроль, рентгеновская интроскопия.

### **III. Этапы проведения расчетов:**

1. **Определение требований к надежности** – каковы допустимые уровни отказов, ожидаемая продолжительность срока службы, критичность устройства.
2. **Сбор данных** – характеристики материалов покрытия, условия эксплуатации, данные о предыдущих отказах.
3. **Выбор методов моделирования и экспериментальных исследований** – зависит от сложности задачи и имеющихся ресурсов.
4. **Проведение расчетов и моделирования** – использование выбранных инструментов для оценки влияния различных факторов.
5. **Проведение экспериментальных исследований** – верификация результатов моделирования.
6. **Анализ результатов** – оценка соответствия покрытия требованиям надежности.
7. **Разработка рекомендаций** – предложения по улучшению материала покрытия, технологии нанесения, конструкции печатной платы.

### **IV. Типовые расчеты и показатели надежности:**

1. **Среднее время наработки на отказ** – демонстрирует среднюю продолжительность безотказной работы.
2. **Вероятность безотказной работы** – вероятность того, что устройство будет функционировать без отказа в течение заданного периода времени.
3. **Интенсивность отказов** – число отказов на единицу времени.
4. **Расчет срока службы** – прогнозирование времени, в течение которого покрытие сохранится в работоспособном состоянии.
5. **Оценка критичности потенциальных дефектов** – какие дефекты в первую очередь приведут к отказу.

Допустим, необходимо оценить надежность покрытия для печатной платы, работающей в условиях высокой влажности и перепадов температур.

1. Определим свойства покрытия: степень влагопоглощения, адгезии и химической стойкости.

2. Условия эксплуатации: высокая влажность и частые температурные перепады могут привести к конденсации влаги, а если в среде присутствуют агрессивные примеси, то к электрохимической коррозии.

3. Моделирование: можно использовать модели диффузии влаги для расчета глубины проникновения влаги в покрытие и на границу раздела «покрытие-плата» за заданный период. Также может быть полезно моделирование температурных циклов для определения зон риска образования конденсата.

4. Эксперимент: проведение испытаний в климатической камере с циклами влажности и температуры, а затем визуальный осмотр и измерения электрических параметров.

Для получения более конкретных расчетов необходимо знать тип влагозащитного покрытия (силикон, полиуретан, акрил, эпоксидная смола и т.д.), его толщину, а также точные условия эксплуатации печатной платы.

Разработка универсальных, «одиночных» формул для расчета надежности влагозащитных покрытий для всех типов покрытий и условий эксплуатации затруднительна. Надежность – это комплексное понятие, зависящее от множества факторов. Однако существуют подходы и модели, основанные на физических принципах и статистических закономерностях, которые позволяют количественно оценивать те или иные аспекты надежности.

Рассмотрим некоторые формулы и подходы, используемые в расчетах надежности влагозащитных покрытий:

#### **I. Модели диффузии влаги:**

Эти модели помогают предсказать, как быстро влага будет проникать в покрытие и достигать поверхности печатной платы.

1. **Закон Фика (первый закон):** описывает стационарную диффузию.

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x},$$

где  $J$  – поток массы (количество вещества, проходящее через единицу площади в единицу времени);  $D$  – коэффициент диффузии (характеризует подвижность молекул в среде);  $\frac{\partial c}{\partial x}$  – градиент концентрации (изменение концентрации вещества по мере удаления от источника). Для влагозащитных покрытий  $C$  – это концентрация влаги,  $x$  – глубина проникновения.

2. **Закон Фика (второй закон):** описывает нестационарную диффузию (изменение концентрации во времени).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2},$$

где  $t$  – время.

Решение этого уравнения для различных граничных условий позволяет рассчитать распределение влаги в покрытии в зависимости от времени, коэффициента диффузии (зависящего от материала покрытия и температуры) и граничных концентраций влаги.

3. **Приближенная модель для расчета максимальной глубины проникновения влаги:**

$$x\sqrt{\pi Dt_{max}}$$

Эта формула дает приблизительную оценку максимальной глубины, на которую влага может проникнуть за время  $t$ .

4. **Коэффициент проницаемости.** Часто используется для характеристики способности материала пропускать вещества, включая влагу.

$$P = D \times S,$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $S$  – коэффициент растворимости.

#### **II. Модели адгезии и отслаивания**

Адгезия в монтаже печатных узлов является критически важным параметром. Плохая адгезия приводит к разрыву молекулярных связей и как следствие – к проникновению влаги и развитию коррозии.

1. **Энергия адгезии** – связана с работой, необходимой для разделения поверхностей. Может быть рассчитана на основе поверхностных энергий материалов.

$$W_{adh} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12},$$

где  $W_{adh}$  – энергия адгезии,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – поверхностные энергии материалов (пленки и подложки),  $\gamma_{12}$  – межфазная энергия.

Чем выше  $W_{adh}$ , тем лучше адгезия.

2. **Критерии отслаивания** – основаны на достижении критического напряжения в месте контакта пленки и подложки, которое может быть вызвано термическими напряжениями (из-за различия коэффициентов теплового расширения) или химическими реакциями. Эти напряжения могут быть учтены по формуле:

$$\sigma_{thermal} \approx \frac{E_{film}}{1-\nu_{film}} (\alpha_{sub} - \alpha_{film}) \Delta T,$$

где  $\sigma_{thermal}$  – термическое напряжение,  $E_{film}$ ,  $\nu_{film}$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона пленки,  $\alpha_{sub}$ ,  $\alpha_{film}$  – коэффициенты теплового расширения подложки и пленки,  $\Delta T$  – изменение температуры.

### III. Модели электрохимической коррозии

Когда влага проникает под покрытие и достигает проводящих элементов (дорожек, контактов), может начаться коррозия, в процессе которой и возникают электрохимические реакции.

**1. Уравнение Батлера-Фольмера** описывает кинетику электрохимических реакций.

$$i = i_0 \left[ \exp\left(\frac{\alpha_{an} n F \eta_{an}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_{cat} z F \eta_{cat}}{RT}\right) \right],$$

где  $i$  – плотность тока,  $i_0$  – плотность тока обмена,  $\eta$  – перенапряжение,  $\alpha$  – коэффициент переноса,  $n$  – число электронов, участвующих в реакции,  $F$  – число Фарадея,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура.

Эта формула сложна для прямого применения к расчету надежности покрытия, но лежит в основе моделей, прогнозирующих скорость коррозии.

**2. Упрощенные модели скорости коррозии** основаны на эмпирических данных и могут выглядеть следующим образом:

$$v_{corr} = k \times C_{electrolyte}^m \times T^n,$$

где  $v_{corr}$  – скорость коррозии,  $k$  – константа, зависящая от материалов  $C_{electrolyte}$  – концентрация электролита (например, солей),  $T$  – температура,  $m$ ,  $n$  – эмпирические экспоненты.

### IV. Статистические модели надежности

Эти модели основаны на анализе данных об отказах.

**1. Экспоненциальное распределение (для постоянной интенсивности отказов):**

$$R(t) = e^{-\lambda t},$$

где  $R(t)$  – функция надежности (вероятность безотказной работы в момент времени,  $\lambda$  – интенсивность отказов (постоянная). Эта упрощенная модель, часто применяется для ранней стадии эксплуатации или для коротких сроков.

**2. Распределение Вейбулла (для изменяющейся интенсивности отказов):**

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right],$$

где  $\eta$  – параметр масштаба (характеризует среднее время жизни),  $\beta$  – параметр формы (характеризует изменение интенсивности отказов):

$\beta < 1$  – интенсивность отказов уменьшается,

$\beta = 1$  – постоянная интенсивность отказов,

$\beta > 1$  – интенсивность отказов увеличивается.

Данное распределение позволяет моделировать различные стадии жизненного цикла.

**3. Среднее время наработки на отказ (MTBF):**

$$MTBF = \int_0^\infty R(t) dt;$$

для экспоненциального распределения:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda};$$

для распределения Вейбулла:

$$MTBF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \text{ где } \Gamma - \text{ гамма-функция.}$$

**Для проведения расчетов по формулам необходимо следовать алгоритму:**

**1. Определить, какой аспект надежности стоит проверить:** скорость проникновения влаги, риск отслаивания или вероятность отказа в целом.

**2. Собрать параметры.** Для моделей диффузии нужны коэффициенты диффузии/проницаемости, для моделей адгезии – поверхностные энергии, для моделей надежности – данные о предыдущих отказах или результаты ускоренных испытаний.

**3. Выбрать подходящую модель.** Для прогнозирования поведения покрытия при длительном воздействии влаги могут хорошо подойти модели диффузии. Для оценки долговечности в условиях циклических температур – модели, учитывающие термические напряжения. Для прогнозирования общего срока службы – статистические модели.

**4. Провести расчеты.**

**5. Верифицировать результаты** с данными экспериментальных испытаний.

Стоит помнить, что эти формулы – инструменты для моделирования и прогнозирования, а не абсолютные показатели надежности покрытий. Точность расчета напрямую будет зависеть от **точности входных данных** (свойств материалов, условий эксплуатации). Более надежным будет подход, учитывающий различные модели и экспериментальные данные.

Для конкретных расчетов необходимо обращаться к справочникам по свойствам материалов, стандартам испытаний и специализированной литературе по надежности электронных компонентов и материалов.

Таким образом, влагозащитные покрытия – неотъемлемая часть современной электроники. Они обеспечивают надёжную работу устройств в сложных условиях, продлевают срок службы изделий и снижают риск отказов. Выбор конкретного типа покрытия зависит от задач производства, условий эксплуатации и требований к ремонтпригодности. Современные материалы открывают новые возможности для массового производства и повышения качества электронной аппаратуры .

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Белик Г. А., Линецкий Б. Л., Нерето М. О., Шихов А. И. Изучение влияния нанопроводимости диэлектриков печатных узлов на работоспособность цифровой электронной аппаратуры // Технологии ЭМС. 2014. № 1. С. 40–45.
2. Кирдяев М. М., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Влагозащитные покрытия печатных плат // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 2. С. 3–6.
3. Левкина Н., Ванцов С., Медведев А. Влагозащитные покрытия печатных плат // Электроника: наука, технология, бизнес. № 7 (178). 2018. С. 124–129.
4. Уразаев В. Г. Влагозащита печатных узлов. М.: Техносфера, 2006, 342 с.
5. Чуйкова Л. Влагозащита радиоэлектронной аппаратуры // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 164–167.

УДК 678.5/.6.06

Филиппов<sup>1</sup> Е.А., Монахов<sup>2</sup> И.А.<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ T-FLEX CAD ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

**Аннотация.** Рассмотрены аспекты проектирования цилиндрических изделий в системе T-FLEX CAD с последующим производством методом 3D-печати. Особое внимание уделено влиянию параметров сетки на функциональные свойства поверхности: от обеспечения гладкости до намеренного создания ребер для улучшения эргономики.

**Ключевые слова:** система автоматизированного проектирования, цилиндрические детали

Filippov<sup>1</sup> E.A., Monakhov<sup>2</sup> I.A.<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## FEATURES OF DESIGN AND MANUFACTURE OF CYLINDRICAL PARTS IN T-FLEX CAD FOR 3D PRINTING

**Abstract.** Aspects of designing cylindrical products in the T-FLEX CAD system with subsequent production by 3D printing are considered. Special attention is paid to the influence of mesh parameters on the functional properties of the surface: from ensuring smoothness to the intentional creation of ribs to improve ergonomics.

**Keywords:** computer-aided design system, cylindrical parts

При подготовке модели к 3D-печати в формате STL информация об объекте сохраняется в виде списка треугольных граней. В T-FLEX CAD пользователь может управлять плотностью этой сетки, что напрямую влияет на физический результат. Рассмотрим как будет влиять на деталь изменение качества сетки.

### 1. Низкое качество

Если вам нужно создать крышку для бутылки или рукоятку инструмента, не обязательно рисовать сложные зубцы или рифление вручную. В настройках T-FLEX можно намеренно снизить количество сегментов аппроксимации (рисунок 1). В параметре «качество изображения» выбираем «Пониженное». Таким образом, цилиндр превратится в правильный многогранник. Эти ребра будут иметь идеальный хват для пальцев, что упрощает откручивание детали.

| Качество сетки       |            |
|----------------------|------------|
| Качество изображения | Пониженное |
| Допуск по ребру      | 5          |
| Точность грани       | 5          |
| Угловой допуск       | 20         |

Рисунок 1 — Настройка качества сетки «пониженное»

Результат построения приведен на рисунке 2.

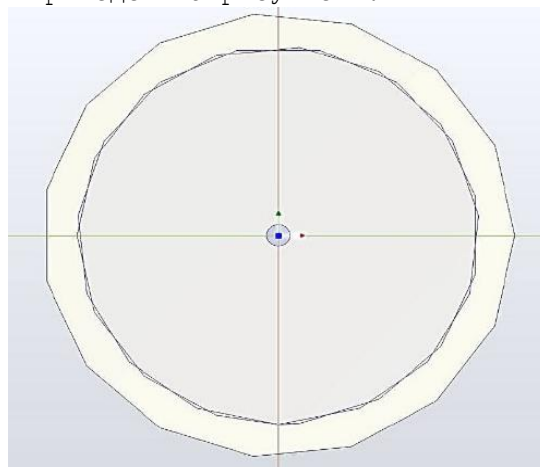


Рисунок 2 — Поверхность при качестве сетки «пониженное»

В настройках экспорта необходимо выбрать качество сетки «пониженное» и только затем сохранить (рисунок 3).

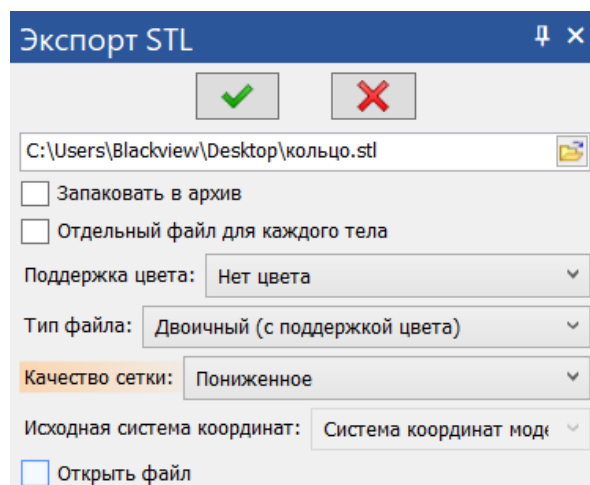


Рисунок 3 – Сохранение параметров при экспорте STL

При таких настройках получается:

1. Эргономическое преимущество – образующие грани (ребра) могут служить естественным рифлением.
2. Экономия ресурсов – упрощенная сетка уменьшает размер STL- файла и ускоряет процесс подготовки управляющей программы в слайсере.

## 2. Высокое качество

При задании параметров высокой точности аппроксимации (сетки) количество треугольников высоко, но не позволяет получить гладкую цилиндрическую поверхность. (рисунок 4) .



Рисунок 4 – Отклонение формы детали от идеально круглой

Чтобы получить цилиндрическую поверхность, близкую к идеально гладкой нужно в параметре «качество сетки» выбрать качество изображения «пользователя» и выставить свои значения (например – рисунок 5) .

| Качество сетки       |              |
|----------------------|--------------|
| Качество изображения | Пользователя |
| Допуск по ребру      | 0.1          |
| Точность грани       | 0.1          |
| Угловой допуск       | 1            |

Рисунок 5 – Настройка качества сетки «пользователя»

В этом случае будет получен результат, который уже обеспечивает гладкую цилиндрическую поверхность (рисунок 6) .

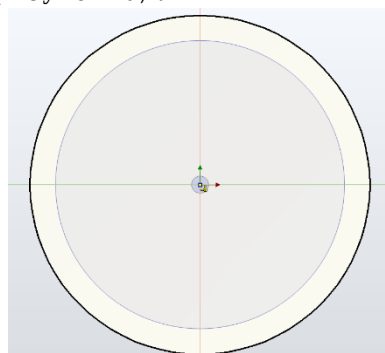


Рисунок 6 – Поверхность при качестве сетки «пользователя»

В настройках экспорта также необходимо выставить данные значения и только затем сохранить (рисунок 7).

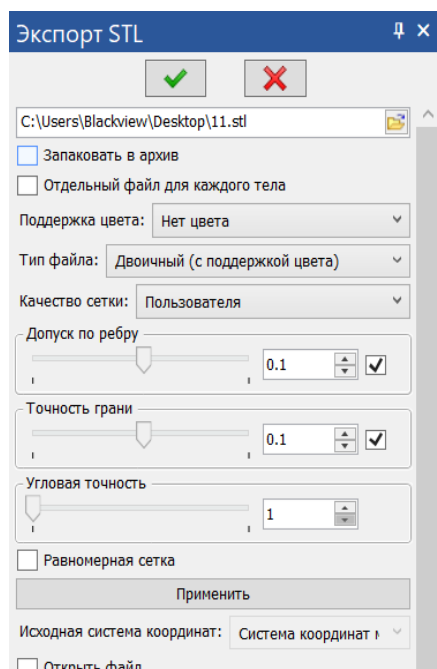


Рисунок 7 – Сохранение параметров при экспорте STL

### 3. Подготовка модели к печати

После создания модели необходимо подготовить ее к печати. В данной работе с помощью слайсера BambuStudio модель разбивается на слои, настраиваются параметры печати.

Вначале модель загружается на рабочий стол, выбирается принтер, на котором будет печататься модель в данном случае – Bambu Lab X1 Carbon, материал – Bambu PLA Basic, выбирается профиль – 0.16 mm Optimal @BBL X1C (рисунок 8).

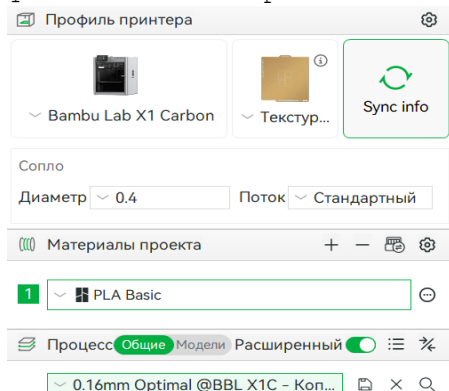


Рисунок 8 – Настройка параметров печати

В разделе «Прочность» напротив параметра «Комбинированное заполнение» ставится галочка, это позволит сократить время печати, так как заполнение будет печататься не на каждом слое, а на двух слоях сразу (рисунок 9).

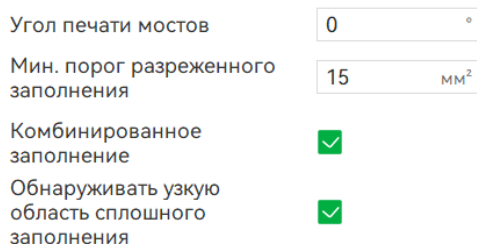


Рисунок 9 – Параметр «Комбинированное заполнение»

Шаблон заполнения верхней поверхности и шаблон сплошного заполнения изменяется на – монотонный.

Задается плотность заполнения – в данном случае 30%.



Включается поддержка, выбирается тип поддержки – древовидная, также возможно использование линейных поддержек, но их сложнее удалить, и есть больший риск повредить поверхность модели. Также расход материала выше, чем при использовании древовидных поддержек. Поддержки важны для сложных моделей с нависающими элементами, их наличие позволяет избежать деформации и обеспечивает стабильность формы детали при печати.

Остальные параметры остаются рекомендованными для данного профиля и материала. Далее нарезаются на слои 3D модель (рисунок 10).

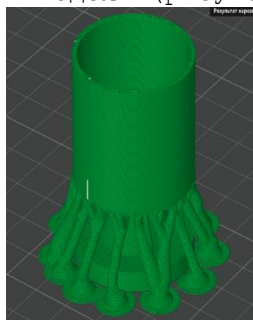


Рисунок 10 – Результат нарезки

#### 4. Выбор материала

Наиболее распространенными для 3D печати материалами являются:

1. PLA (полилактид). Данный материал является продуктом природного происхождения. Его основу составляет молочная кислота, получаемая из кукурузы, сахарного тростника, картофеля и другого сельскохозяйственного сырья.

**Ключевые преимущества:** материал отличается простотой печати и минимальной усадкой при остывании; превосходно адгезирует к рабочей поверхности даже без ее подогрева; обладает твердостью и прочностью, практически не подвержен пружинистости; хорошо выдерживает сжимающие, растягивающие и изгибающие нагрузки; нетоксичен и легко поддается механической обработке.

**Недостатки:** подвержен разложению с течением времени, особенно под воздействием открытого воздуха, перепадов температур и повышенной влажности.

2. ABS – сополимер акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Это инженерный пластик с повышенной ударопрочностью, отличающийся высокой механической прочностью, жесткостью и износостойкостью.

ABS считается одним из наиболее прочных материалов, используемых в любительской 3D-печати, уступая разве что PETG и NYLON, да и то с определенными оговорками. Под нагрузкой он деформируется значительно сильнее PLA, но несколько меньше PETG, восстанавливая первоначальную форму и габариты после снятия нагрузки.

В процессе печати выделяет умеренно вредные испарения с выраженным химическим запахом, поэтому помещение, где ведется печать ABS, требует обязательной вентиляции. В отвержденном состоянии практически нетоксичен, однако его применение для пищевой посуды и медицинских изделий нежелательно.

Назвать ABS простым в печати нельзя – это один из самых капризных пластиков. Однако к его особенностям можно приспособиться, если учитывать специфику материала и соблюдать определенные правила. Основная сложность заключается в значительной термической усадке. При остывании деталь сжимается, что способно вызвать ее отрыв от платформы прямо в ходе печати. Неравномерное остывание грозит потерей точности геометрических размеров и форм.

ABS неохотно прилипает к рабочему столу. Для надежной фиксации, особенно крупных моделей, рекомендуется:

- точная калибровка положения стола;
- высокая температура подогрева платформы (до 100 °C и выше);
- применение адгезивов;
- использование специализированных стекол;
- защита области печати от сквозняков.

Сравнение характеристик PLA и ABS:

| Технические характеристики              | PLA         | ABS      |
|-----------------------------------------|-------------|----------|
| Плотность (гр/см <sup>3</sup> )         | 1.25        | 1.05     |
| Предел прочности на разрыв (МПа, 23 °C) | 28 МПа      | 30 МПа   |
| Температура размягчения                 | ~ 60 °C     | ~ 110 °C |
| Температура плавления                   | ~ 180 °C    | ~ 220 °C |
| Температура экструзии                   | ~190-200 °C | ~220 °C  |

### 5. Оптимальная ориентация 3D-модели перед печатью

Выбор правильной ориентации детали на платформе 3D-принтера является одним из ключевых этапов подготовки к печати, требующим вдумчивого и взвешенного подхода. От того, насколько грамотно будет расположена модель, напрямую зависят такие критически важные параметры, как общая продолжительность изготовления изделия, расход филамента, необходимость использования поддерживающих структур и, в конечном счете, качество и механические свойства готового объекта.

Рассмотрим на двух примерах (рисунок 11, рисунок 12) ключевые факторы, определяющие оптимальную ориентацию модели.

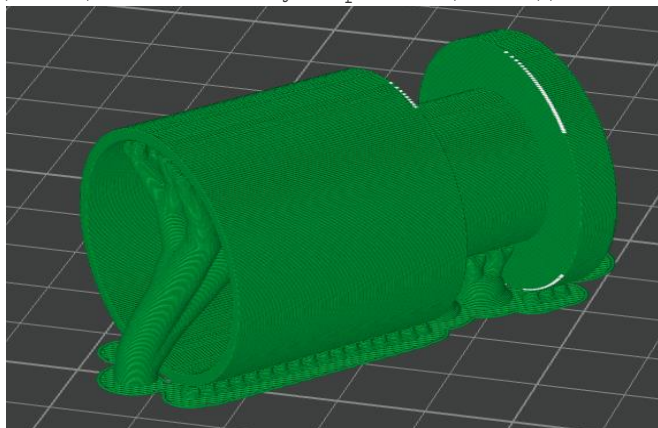


Рисунок 11 — Горизонтальная ориентация

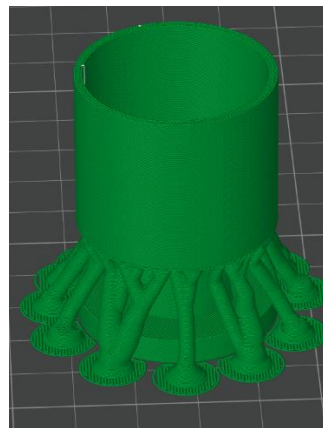


Рисунок 12 — Вертикальная ориентация

Выбор оптимальной грани для устойчивости и адгезии. Поверхность, на которую модель опирается в процессе печати, должна обладать достаточной площадью для обеспечения надежного сцепления с платформой на протяжении всего цикла изготовления. Это фундаментальное требование, гарантирующее, что деталь не оторвется от стола под собственным весом или под воздействием термических напряжений.

В примере при горизонтальной ориентации основание модели меньше по площади, что ухудшает адгезию к платформе принтера. В начале печати вероятны проблемы с удержанием формы. Большая часть конструкции находится в «нависающем» положении, требующем дополнительных поддерживающих структур.

При вертикальной ориентации основание шире и ровнее, обеспечивает максимальный контакт с платформой принтера. Стабильность в процессе печати выше, риск отклеивания минимален. Вертикальное расположение цилиндрической части соответствует рекомендациям для печати цилиндрических объектов, это улучшает качество поверхности и точность геометрии.

Анализ механических напряжений, действующих на деталь. Если предполагается, что готовая деталь будет подвергаться эксплуатационным нагрузкам, ее ориентация должна быть подчинена законам физики и прочности слоистых структур. Прочность сцепления между отдельными слоями всегда ниже, чем прочность самого материала в пределах одного слоя. Иными словами, вертикальное направление сборки является ахиллесовой пятой детали, так как оно целиком зависит от адгезии между слоями, а не от монолитных свойств материала. Игнорирование этого правила может привести к расслоению и разрушению изделия под нагрузкой.

На практике это хорошо иллюстрируют напечатанные на 3D-принтере детали с резьбой (рисунок 13).



Рисунок 13 — Примеры деталей с резьбой

При вертикальной ориентации (как у детали справа) в области резьбы слои испытывают сдвиговые нагрузки. Из-за недостаточной адгезии между слоями, резьба отломилась.

При горизонтальной ориентации (как у детали слева) механические напряжения распределены вдоль оси печати, что соответствует направлению наибольшей прочности материала. Также вертикальные выступы («юбка») печатаются как отдельные элементы, что снижает риск деформации.

Продолжительность процесса напрямую коррелирует с ориентацией модели: более высокая деталь (с большим количеством слоев) будет печататься дольше, даже если площадь ее основания мала. И наоборот, та же деталь, расположенная горизонтально, может иметь меньше слоев, но требовать печати обширных поддержек, что тоже значительно увеличит общее время. Таким образом, задача сводится к поиску баланса, позволяющего сократить время печати до минимума без критического ущерба для других параметров, что напрямую влияет на производительность и эффективность работы.

При горизонтальной ориентации большее количество поддерживающих структур увеличивает время печати на 14% по сравнению с вертикальной (рисунок 14).

| Результат нарезки        |                   |                  |                   |
|--------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Цветовая схема           | Профиль прутка    |                  |                   |
| Профиль прутка           | Модели            | Поддержка        | Всего             |
| ■ 1                      | 3,74 m<br>11,32 g | 0,82 m<br>2,50 g | 4,56 m<br>13,82 g |
| Кол-во смен материала: 1 |                   |                  |                   |
| Стоимость: 0,35          |                   |                  |                   |
| Оценка времени           |                   |                  |                   |
| Время подготовки:        |                   | 8m18s            |                   |
| Расчётное время печати:  |                   | 39m6s            |                   |
| Общее время печати:      |                   | 47m25s           |                   |

Рисунок 14 – Время печати при ориентации горизонтально

Сложность траектории печатающей головки (из-за горизонтальных нависающих элементов) замедляет процесс. Повышен риск ошибок и необходимости перезапуска печати.

При вертикальной ориентации количество поддержек минимально, траектория печати для основной цилиндрической части прямая. За счет уменьшения объема поддерживающего материала время на печать сокращается (рисунок 15).

| Результат нарезки        |                   |                  |                   |
|--------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Цветовая схема           | Профиль прутка    |                  |                   |
| Профиль прутка           | Модели            | Поддержка        | Всего             |
| ■ 1                      | 3,74 m<br>11,32 g | 1,19 m<br>3,62 g | 4,93 m<br>14,95 g |
| Кол-во смен материала: 1 |                   |                  |                   |
| Стоимость: 0,37          |                   |                  |                   |
| Оценка времени           |                   |                  |                   |
| Время подготовки:        |                   | 8m18s            |                   |
| Расчётное время печати:  |                   | 31m49s           |                   |
| Общее время печати:      |                   | 40m7s            |                   |

Рисунок 15 – Время печати при ориентации вертикально

Поддержки являются неизбежным злом при печати моделей со сложной геометрией, поэтому их количество следует всеми силами минимизировать. Основные причины этого очевидны: поддержки не только увеличивают расход материала и время печати, но и создают дополнительные проблемы на этапе постобработки. Их удаление может быть крайне затруднительным, особенно в труднодоступных местах, и существует высокий риск повреждения основной поверхности детали, оставляя после себя шероховатости, сколы или следы, требующие последующей шлифовки или иной финишной обработки.

Горизонтальная модель требует обширных поддерживающих конструкций для: цилиндрической части (если она не лежит на столе); всех выступающих элементов «юбки»; переходов между элементами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://top3dshop.ru>
2. <https://3dradar.ru/>
3. <https://cvetmir3d.ru/blog/news/3d-pechat>

УДК 618.1

**Калинин<sup>1</sup> Е. А.**

<sup>1</sup> Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Россия

<sup>1</sup> Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», Москва, Россия

<sup>1</sup> kalinineugene@inbox.ru

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ, ИЗГОТАВЛИВАЕМОЙ И ИСПЫТЫВАЕМОЙ В РАМКАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы порядка и методов контроля опытных образцов на этапе жизненного цикла продукции «Разработка», недостатки существующего контроля по альтернативному признаку. Предложены меры по совершенствованию методов контроля путем введения оценки по количественному признаку, что обеспечивает существенное снижение вероятности пропуска дефектов на этапе «Разработка» и их переход на этап серийного производства.

**Ключевые слова:** СМК, приемочный контроль, опытно-конструкторская работа, контроль опытных образцов, испытание опытных образцов, разработка, контроль на этапе разработки

**Kalinin<sup>1</sup> E. A.**

<sup>1</sup> State Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, Russia

<sup>1</sup> Scientific and Educational Center of aerospace Defense "Almaz-Antey", Moscow, Russia

<sup>1</sup> kalinineugene@inbox.ru

### **IMPROVEMENT OF CONTROL METHODS FOR PILOT BATCH MANUFACTURED AND TESTED AS PART OF DEVELOPMENT WORK**

**Abstract.** The issues of the procedure and methods of control of prototypes at the stage of the product life cycle "Development," the shortcomings of the existing control on an alternative basis were considered, measures were proposed to improve the control methods by introducing an assessment on a quantitative basis, which significantly reduces the likelihood of missing defects with a low probability of occurrence at the stage "Development" and their transition to the stage of serial production.

**Keywords:** QMS, acceptance control, development work, control of prototypes, testing of prototypes, development, control at the stage of development

Объемы производства и опыт эксплуатации продукции оборонно-промышленного комплекса (ОПК) подтвердил важную роль системы управления качеством и надежностью (СУКНП) и необходимость ее дальнейшего совершенствования [0 – 0].

Современные разработка и производство радиоэлектронной продукции (РЭП) связаны с [0]:

- повышением технологичности, сложности технологических и технических решений;
- повышением требований к параметрам как электрическим, так и надежности;
- высокой надежностью РЭП предыдущих поколений, базовых технологий и технических решений;
- высокими потенциальными затратами, связанными с конструктивными доработками РЭП;

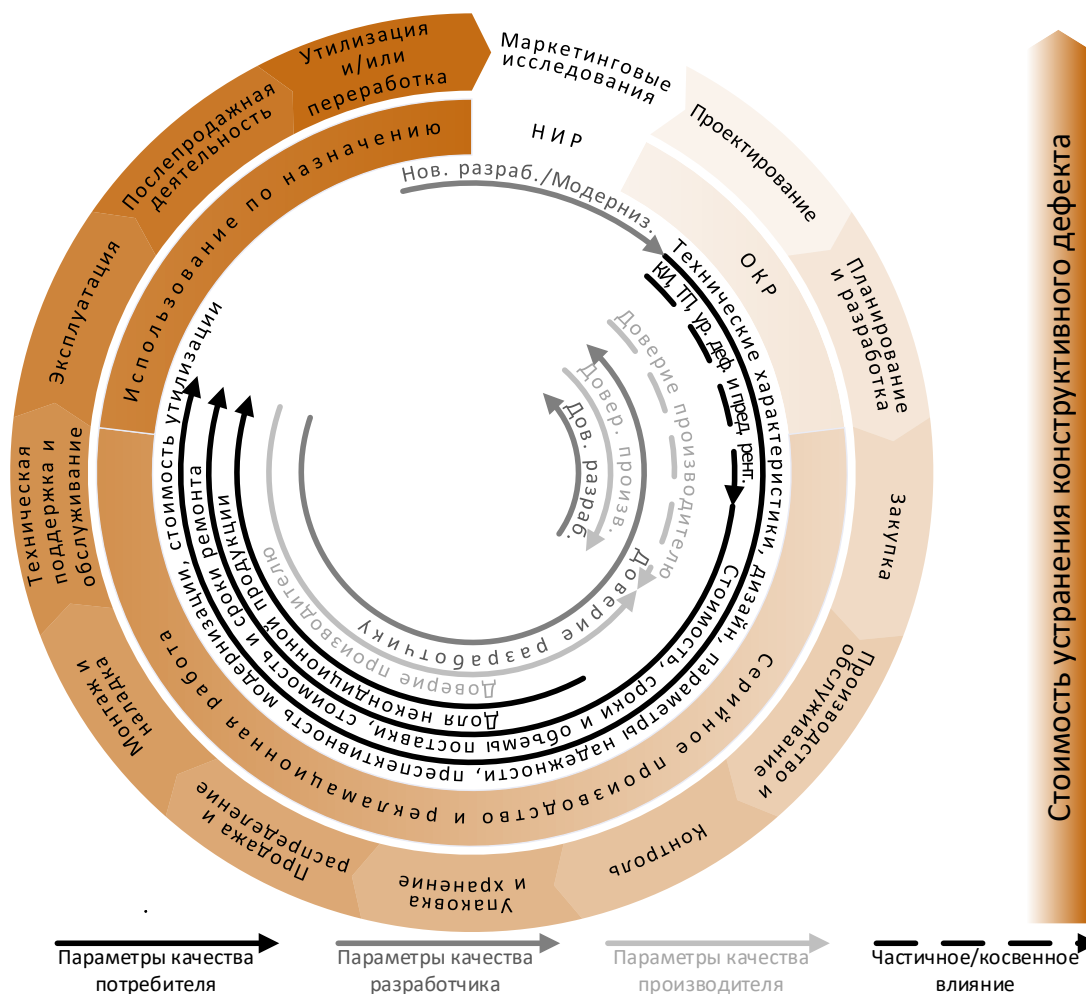
Современный период развития СУКНП связан с широким внедрением статистических методов, внедрением комплексных показателей оценки и контроля качества, и переходом к управлению полным жизненным циклом продукции (ЖЦП) [0]. Переход от классических методов управления к управлению полным ЖЦП требует изменения критериев оценки качества. Поскольку в классических методах этапы ЖЦП рассматриваются независимо друг от друга критерии оценки качества трансформируются при переходе на следующий этап.

Примером такой трансформации является изменение критериев качества при переходе от этапа «Разработка» (технические характеристики, параметры надежности и стандартизации) к этапу «Производство» (дефектность, доступность комплектующих, потребность в специализированном оборудовании) и далее к этапу «Эксплуатации» (эксплуатационная надежность, стоимость эксплуатации, объем производства, стоимость и скорость ремонта, возможность модернизации, стоимость утилизации).

Модель полного ЖЦП с трансформацией показателей качества при переходе от одного этапа ЖЦП к другому и градиентом увеличения затрат на устранение конструктивных дефектов показана на рисунке 1.

Очевидно, что наименьшая возможная стоимость устранения дефектов достигается на этапе маркетинга. Однако на этапе маркетинга могут быть устранены только ошибки, связанные с требованиями к качеству продукции. Однако ошибки проектирования, технологии изготовления, проблема стабильности получаемых характеристик и иные проблемы производственного характера могут быть выявлены только при проектировании и опытном производстве. Внедрение современных методов и техно-

логий позволяет существенно снизить количество проектных ошибок до начала опытного производства [0]. При этом при малой вероятности возникновения имеется большая (более 5%) вероятность не выявления проектных ошибок на этапе «Разработка» и соответственно их переход на этап серийного производства.



3 – Структура ЖЦП и градиент затрат

Этап ЖЦП «Разработка» по смыслу и составу в общем случае соответствует опытно-конструкторской работе (ОКР). Состав и структура этапов определяется комплексом стандартов ГОСТ 15-й серии. В рамках ОКР производятся следующие работы:

- разработка эскизного проекта (ЭП);
- разработка технического проекта (ТП);
- разработка рабочей конструкторской документации (РКД);
- проведение предварительных испытаний (ПИ);
- проведение межведомственных/государственных (МВИ/ГИ) испытаний.

Существующий подход к испытаниям в процессе ОКР заключается в:

сплошном контроле параметров опытной партии в рамках предъявительских и приемосдаточных (при их наличии) испытаний;

контроле параметров и отсутствии отказов при производстве и испытании установочной партии в рамках квалификационных испытаний.

Контроль в общем случае сводится к проверке соответствия получаемых параметров предельным допускам. Такой подход к контролю схож с применяемым при статистическом приемочном контроле по альтернативному признаку. Тогда вероятность выявления дефектов будет определяться вероятностью его возникновения:

$$P_n(A_k) = \frac{C_n^k p^k q^{n-k}}{n!}, \quad (1)$$

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (2)$$

$$q = 1 - p, \quad (3)$$

где  $n$  – количество всего произведенных изделий,

$k$  – количество изделий успешно прошедших цикл испытаний,

$p$  – вероятность отказа изделия.

Поскольку

$$C_n^k = 1 \text{ при } n = k. \quad (4)$$

Вероятность передачи документации в серийное производство при отсутствии отказов будет определяться как

$$P_N(A_N) = p^N, \quad (5)$$

где  $N$  – количество ОО, изготовленных в рамках ОКР.

При этом необходимо учесть, что поскольку изделия, находящиеся в разработке, предполагают высокую возможность возникновения дефектов в опытном производстве, допускается возникновение «единичных отказов». Наличие таких отказов в первую очередь связывают не с ошибками проектирования, а с повышенной нестабильностью опытного производства. Таким образом ремонт по таким отказам может производиться путем замены элементов, повторной настройки и калибровки, изготовлением нового образца взамен отказавшего. Схожая ситуация наблюдается при проведении ПИ и МВИ/ГИ, за исключением того, что при отказах на испытаниях предполагается испытание на удвоенном количестве комплектов. Тогда вероятность выявления дефектов будет определяться, как:

$$P_{N,N_2}(A_N + A_{N_2-1}) = p^N + C_{N_2-1}^{N_2-1} p^{N_2-1} q, \quad (6)$$

$$N_2 = N + 1, \quad (7)$$

где  $N$  – количество ОО изготовленных в рамках ОКР до проведения предварительных испытаний,

$N_2$  – количество ОО, изготовленных в рамках ОКР при условии наличия «единичного дефекта» при проведении ПСИ.

$$P_{N,N_3}(A_N + A_{N_3-1}) = p^N + C_{N_3-1}^{N_3-1} p^{N_3-1} q, \quad (8)$$

$$N_3 = N + 1, \quad (9)$$

где  $N$  – количество ОО изготовленных в рамках ОКР до проведения предварительных испытаний,

$N_3$  – количество ОО, изготовленных в рамках ОКР при условии наличия «единичного отказа» при проведении ПИ/МВИ/ГИ.

$$P_{N,N_2,N_3}(A_N + A_{N_2-1} + A_{N_3-1}) = P_N(A_N) + P_{N_2}(A_{N_2-1}) + P_{N_3}(A_{N_3-1}), \quad (10)$$

$$N_2 = N + 1, \quad (11)$$

$$N_3 = N_2 + 2, \quad (12)$$

где  $N$  – количество ОО изготовленных в рамках ОКР до проведения предварительных испытаний,

$N_2$  – количество ОО, изготовленных в рамках ОКР при условии наличия «единичного дефекта» при проведении ПСИ,

$N_3$  – количество ОО, изготовленных в рамках ОКР при условии наличия «единичного отказа» при проведении ПИ/МВИ/ГИ.

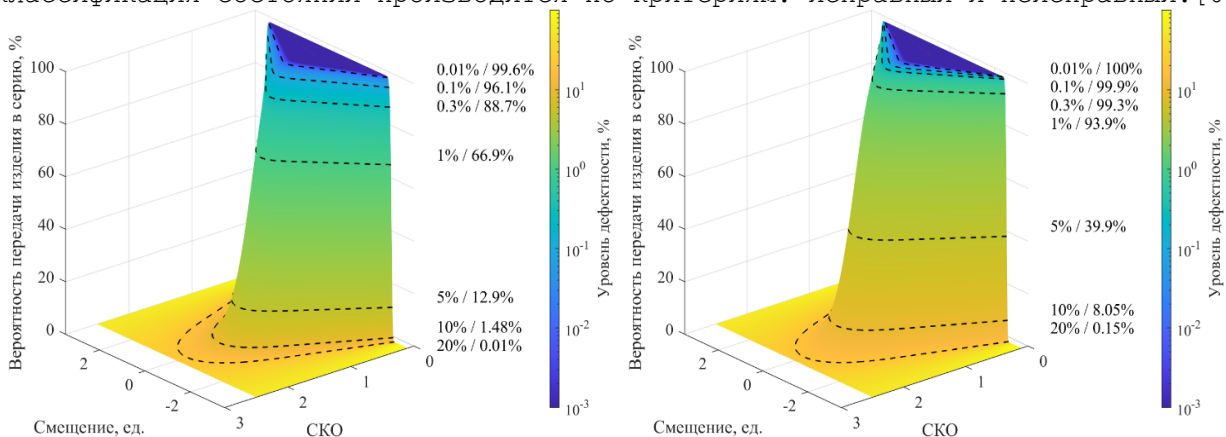
При условии осуществления ремонта и выборки изделий для испытания из ранее изготовленных, вместо изготовления дополнительных образцов, вероятность выявления дефектов будет определяться вероятностью его возникновения с учетом допущения отказов, как:

$$P_N(A_N + A_{N-1} + A_{N-2}) = P_N(A_N) + P_N(A_{N-1}) + P_N(A_{N-2}), \quad (13)$$

где  $N$  – количество ОО изготовленных в рамках ОКР;

Оперативная кривая, соответствующая вероятности приемки изделия в опытном производстве при различной вероятности их возникновения, связанной с вариабельностью и центрированием процессов, представлена на рисунке 2.

Проблематика подобного подхода к контролю, и необходимость совершенствования методов контроля/диагностики встречается так же в диагностических системах, где классификация состояний производится по критериям: исправный и неисправный. [0]





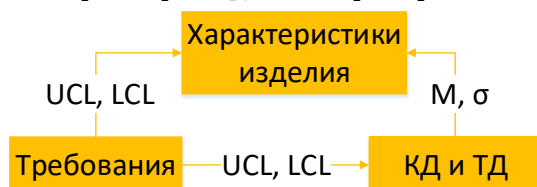
Анализ показывает, что существует большая (более 5%) вероятность пропуска дефектов с достаточно высокой вероятностью возникновения на этапе «Разработка». При этом норма риска ошибки 1-го рода – принятия гипотезы при ее неверности – в 5% рекомендуется в системе ГОСТ в области СМК, широко применяется при множестве иных статистически исследований. В терминах ОКР и этапа отработки опытного образца и его технологии изготовления ошибкой 1-го рода будет передача изделия в серийное производство при наличии избыточной вероятности получения дефектов.

На практике и исходя из рекомендаций ГОСТ Р ИСО 50779.44 и ГОСТ Р ИСО 7870-2 приемлемая вероятность возникновения дефектов в стабильных процессах составляет не более 0,3%, предпочтительной является вероятность возникновения дефектов, составляющая не более 0,1%, исходя из количества отказов не более 1 при производстве 1000 изделий в год.

При отсутствии иных требований система ГОСТ в области СМК рекомендует ограничение риска ошибки первого рода уровнем в 5%. Тогда целевым уровнем вероятности принятия изделия с соответствующим уровнем дефектности должен быть не менее 95%, при этом чем больше будет крутизна оперативной характеристики, тем эффективнее будет контроль изделия.

Проведенный анализ, а также проведенные ранее исследования по тематике совершенствования методов статистического контроля [0, 0] показывают необходимость внедрения дополнительных инструментов контроля. Такими инструментами могут являться показатели приемлемости и статистический контроль по количественному признаку и иные методы статистического управления, направленные на выявление и устранение отклонений от предъявляемых к процессу требований. [0 – 0]

Рассматривая параметры РЭП как случайную величину, подчиняющуюся некоторому закону распределения (в качестве наиболее простого случая будет рассматриваться нормальный закон распределения) можно выявить взаимосвязь проектных параметров РЭП и параметров функции распределения, показанную на рисунке 3.



5 – Взаимосвязь проектных параметров и функции распределения характеристики изделия

Предельно-допустимая дефектность может быть определена, как вероятность выхода случайной величины за контрольные границы:

$$P(X_{min} < X < X_{max}) = 1 - P_{доп},$$

где  $P(X_{min} < X < X_{max})$  – вероятность нахождения параметров изделия в пределах допуска,

$P_{доп}$  – предельно допустимая вероятность получения дефекта в нормальном технологическом процессе, вариабельность которого вызвана общими причинами.

Предельно допустимая вероятность получения дефекта в общем случае определяется исходя из особенностей технологии и объема производства, а также принятых процедур и жесткости контроля ЭРИ. Наиболее правильным будет определение  $P_{доп}$  с учетом предыдущего опыта проектирования аналогичных узлов РЭП.

Практика анализа результатов параметрического контроля показывает, что в реальных РЭП могут встречаться следующие особенности:

- распределение параметра отличное от нормального;
- дисперсия, значительно отличающаяся от расчетной/предполагаемой  $\sigma_{доп}$ ;
- смещение распределения.

Поскольку предельные границы характеристик ЭРИ связаны с предельно-допустимым уровнем дефектности через функцию плотности распределения. Данную взаимосвязь можно представить следующим уравнением:

$$X_{ном} = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}$$

$$\sigma_{доп} = \frac{X_{max} - X_{min}}{2 * n_{ЭРИ}}$$

$$P(X_{min} \leq X \leq X_{max} | \mu = X_{ном}, \sigma = \sigma_{доп}) = 1 - P_{доп},$$

где  $X_{ном}$  – номинальное значение параметра, или середина допуска;

$n_{ЭРИ}$  – процентиль стандартного распределения  $1 - P_{доп}$  уровня;

$\sigma_{доп}$  – предельно-допустимое среднеквадратичное отклонение (СКО).

Тогда, с учетом номинального значения параметра, являющегося его математическим ожиданием двухсторонняя вероятностная граница будет определяться как:

$$UC_{ном}L = X_{max} = X_{ном} + n_{ЭРИ} * \sigma_{доп}$$

$$LC_{ном}L = X_{min} = X_{ном} + n_{эри} * \sigma_{доп}$$

где  $UC_{ном}L$  – верхняя часть двухсторонней вероятностной границы;

$LC_{ном}L$  – нижняя часть двухсторонней вероятностной границы;

$X_{max}$  – предельно-допустимое максимальное значение параметра (верхний допуск);

$X_{min}$  – предельно-допустимое минимальное значение параметра (нижний допуск).

При учете действительной дисперсии:

$$P(UC_pL \leq X \leq LC_pL | \mu = X_{ном}, \sigma = \sigma_d) = 1 - P_{доп}, \text{ при } \sigma_d = \sigma_{доп}$$

$$P_{дн} = 1 - P(X_{min} \leq X \leq X_{max} | \mu = X_{ном}, \sigma = \sigma_d)$$

$$\sigma_d = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$UC_pL = X_{ном} + n_{эри} * \sigma_d$$

$$LC_pL = X_{ном} - n_{эри} * \sigma_d,$$

где  $P_{дн}$  – действительная без учета положения среднего вероятность получения брака в нормальном технологическом процессе, вариабельность которого вызвана общими причинами;

$UC_pL$  – максимальное ожидаемое значение параметра прибора с учетом заданной дефектности;

$LC_pL$  – минимальное ожидаемое значение параметра прибора с учетом заданной дефектности;

$\sigma_d$  – несмещенная оценка действительного среднеквадратичного отклонения параметра по  $S$  статистике;

$n$  – объем выборки;

$S^2$  – несмещенная оценка дисперсии.

При проектировании РЭП могут часто наблюдаться ситуации, когда принятые решения определяют математическое ожидания параметра относительно номинального значения.

Тогда, с учетом смещения математического ожидания, наиболее верным будет следующее определение показателей:

$$P(UC_{pk}L \leq X \leq LC_{pk}L | \mu = E, \sigma = \sigma_d) = 1 - P_{доп}, \text{ при } E = X_{ном} \text{ и } \sigma_d = \sigma_{доп}$$

$$P_d = 1 - P(UC_{pk}L \leq X \leq LC_{pk}L | \mu = E, \sigma = \sigma_d)$$

$$E = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$LC_{pk}L = E - n_{эри} * \sigma_d$$

$$UC_{pk}L = E + n_{эри} * \sigma_d,$$

где  $P_d$  – действительная вероятность получения брака в нормальном технологическом процессе, вариабельность которого вызвана общими причинами,

$UC_{pk}L$  – максимальное значение параметра прибора с учетом заданной дефектности;

$LC_{pk}L$  – минимальное значение параметра прибора с учетом заданной дефектности;

$E$  – несмещенная оценка математического ожидания.

Для возможности обеспечения требуемой дефектности должны получить следующее соотношение:

$$UC_{pk}L \leq UC_{ном}L$$

$$LC_{pk}L \geq LC_{ном}L$$

Примером идеального соответствия соотношения двухсторонних вероятностных границ является случай полного соответствия полученной конструкции модельному описанию, тогда будет обеспечиваться:

$$UC_pL = UC_{pk}L = UC_{ном}L$$

$$LC_pL = LC_{pk}L = LC_{ном}L$$

Данное соотношение исходя из заложенного принципа аналогично индексу пригодности процесса с учетом положения среднего ( $P_{pk}$ ) [5]:

$$P_{pk} = \min\left(\frac{(X_{max}-E)}{3\sigma_d}, \frac{(E-X_{min})}{3\sigma_d}\right),$$

где  $P_{pk}$  – индекс пригодности процесса с учетом положения среднего.

Однако, данный индекс, в отличие от предложенной двухсторонней вероятностной границы, имеет ряд недостатков:

– для понимания процентного уровня получаемой дефектности необходимы дополнительные преобразования, или использование табличных значений;



– таблицы [0] не содержат значений показателей для вероятности появления брака меньшей 66 ед. на 1 млн. изделий, что потребует дополнительного расчета данных показателей исходя из  $P_{\text{доп}}$  для крупносерийных производств (микроэлектроника, автомобилестроение);

– может использоваться в неизменном виде только со случайными величинами, распределенными по нормальному закону;

– для сравнения полученной и предельно-допустимой дефектности используется заданный процентиль нормального распределения уровня 99,73%;

– в соответствии с требованиями [0] должен применяться при анализе совместно со стандартными контрольными картами Шухарта;

– невозможность использования более робастных метрик и эмпирических функций распределения при расчете индекса по описанной в [0] методике.

При этом индекс пригодности с учетом положения среднего является частным случаем соотношения двух СКО при  $n_{\text{эри}} = 3$ :

$$P_{pk} = \min \left( \frac{(X_{\max} - E)}{3\sigma_d}, \frac{(E - X_{\min})}{3\sigma_d} \right) = \min \left( \frac{UC_{\text{ном}}L - E}{UC_{pk}L - E}, \frac{E - LC_{\text{ном}}L}{E - LC_{pk}L} \right)$$

Для исключения влияния указанных выше недостатков предложим показатель, позволяющий определить соотношение допуска и действительной дисперсии, но не основанный на применении квантиля нормального распределения, а, следовательно, лишенный указанных выше ограничений:

$$k_{pk} = \frac{P_{\text{доп}}}{P_d},$$

где  $k_{pk}$  – коэффициент соотношения предельно-допустимой дефектности к действительно-ожидаемой.

Очевидно, что в избыточную дефектность вносит вклад, как смещения математического ожидания, так и отклонение дисперсии от расчетных величин.

Предложим следующие коэффициенты, показывающие соотношение модельной оценки и реально полученного распределения параметра, по результатам производства опытной партии:

$$\begin{aligned} E_{\Delta} &= X_{\text{ном}} - E; \\ P_{MS} &= 1 - P(X_{\max} + E_{\Delta} \leq X_{\text{ном}} \leq X_{\min} + E_{\Delta} | X_{\text{ном}}, \sigma_{\text{доп}}) \\ P_{VM} &= 1 - P(X_{\text{ном}} - n_{\text{эри}} * \sigma_d \leq X_{\text{ном}} \leq X_{\text{ном}} + n_{\text{эри}} * \sigma_d | X_{\text{ном}}, \sigma_{\text{доп}}) \\ k_{MS} &= \frac{P_{\text{доп}}}{P_{MS}} * 100, \\ k_{VM} &= \frac{P_{\text{доп}}}{P_{VM}} * 100 \end{aligned}$$

Рассмотрим «физический» смысл предложенных коэффициентов и их предельные значения.

Коэффициент  $k_{MS}$  – показывает то, какую долю с учетом смещения описывает модельная оценка распределения параметра, то есть степень влияния смещения;

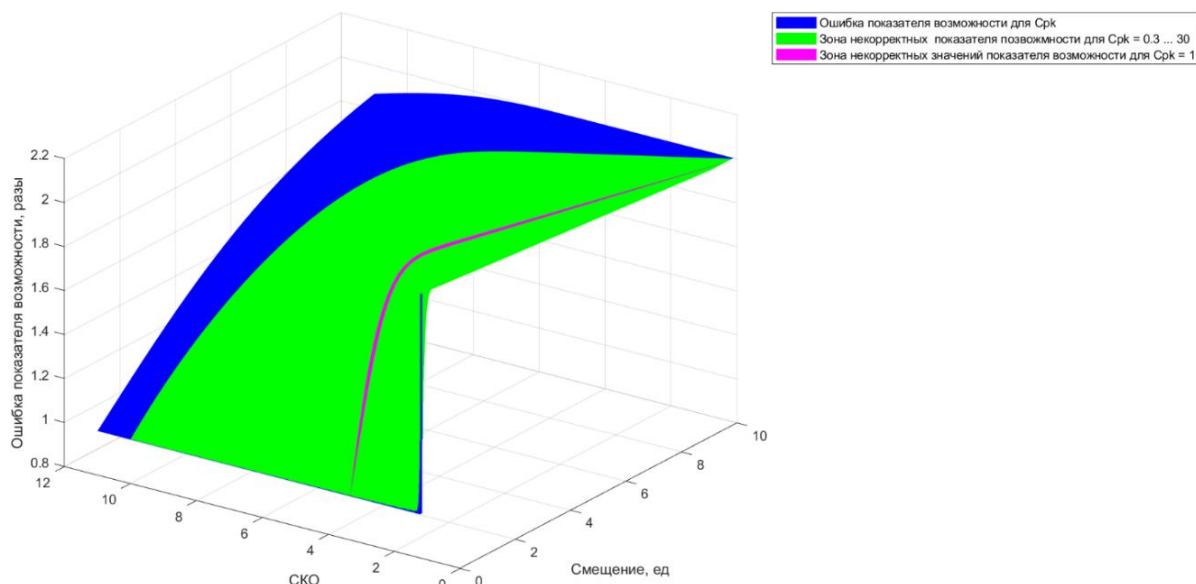
Коэффициент  $k_{VM}$  – показывает то, какую долю с учетом действительной дисперсии описывает модельная оценка распределения параметра, то есть степень влияния действительной дисперсии;

Коэффициент  $k_{pk}$  – показывает соотношения предельно-допустимой и действительной дефектности, то есть является комплексным показателем, отражающим степень избыточной дефектности через обратную зависимость.

Для контроля стабильности производства и получаемых параметров в соответствии с [0], как правило применяются показатели  $C_p$  и  $C_{pk}$ , смысл и формула расчета которых схожа с показателем  $P_{pk}$ .

Проведем сравнение показателей  $C_{pk}$  и  $k_{pk}$  в общем случае в различном диапазоне значений смещения среднего и значений СКО. На рисунке синим цветом показано отношение  $C_{pk}$  к  $k_{pk}$ , зеленым цветом показана область внутри которой для распределений с показателем  $C_{pk}$  от 0,3 до 30 будет сделан неверный вывод о превышении вероятности дефекта в отличии от показателя  $k_{pk}$ , розовым цветом показана область для  $C_{pk} = 1$ . Результаты анализа показывают, что разница между показателями отсутствует при отсутствии смещения и начинает расти до 2-х кратного превышения оценки вероятности дефекта по показателю  $C_{pk}$  в сравнении с показателем  $k_{pk}$ .

Таким образом применение нового показателя позволяет до 2-х раз увеличить точность определения вероятности дефекта изделия, вызванного случайными факторами.



При введении контроля аналогичного приемочному контролю по количественному признаку по ГОСТ Р ИСО 3951 серии вероятность пропуска дефектов в опытном производстве будет определяться, как:

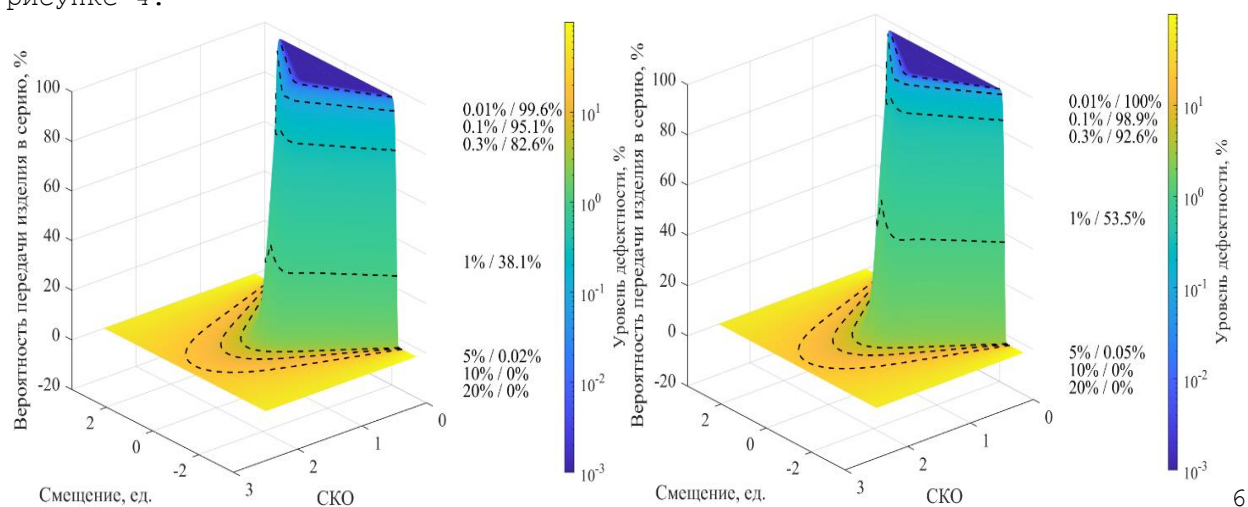
$$P_N(AB) = P_N(A) * P_N(B), \quad (14)$$

$$P_N(B) = P\left(\sigma_d^2 \leq \frac{(N-1)\sigma_{доп}^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}, N-1}^2}\right), \quad (15)$$

$$\sigma_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}, \quad (16)$$

где  $N$  – количество ОО изготовленных в рамках ОКР;

Применение дополнительно контроля по количественным признакам позволяет создать комбинированный метод контроля с оперативной кривой, представленной на рисунке 4.

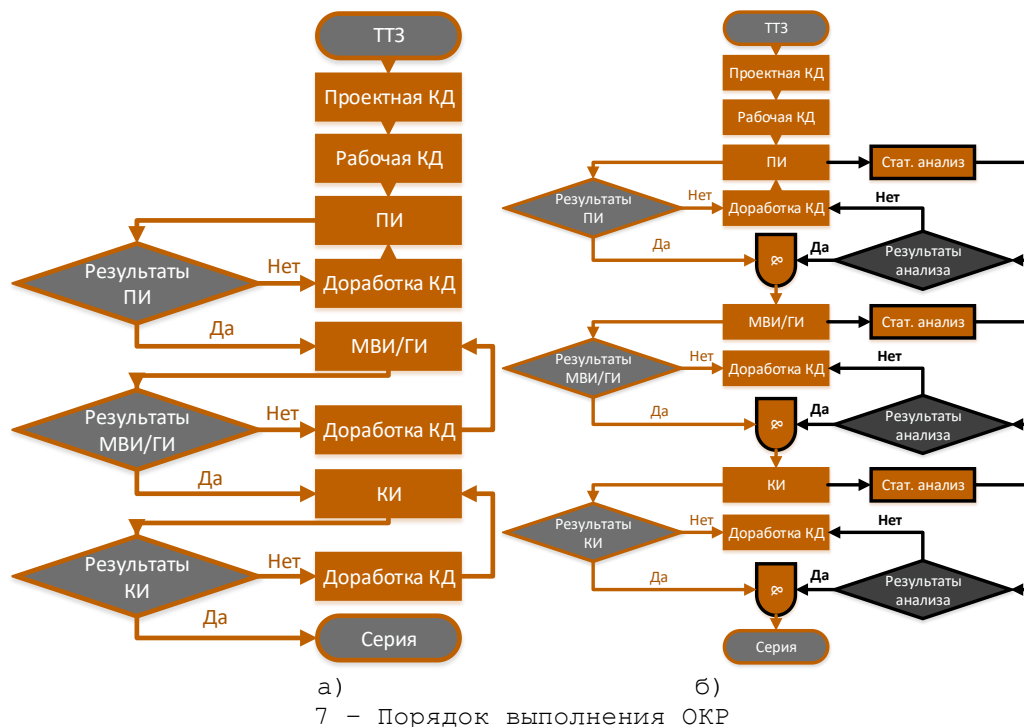


– Вероятность передачи изделия в серию без «единичных дефектов», «единичных отказов» и контроле оценки СКО при  $S_{доп,0} = 3$

Разница между оперативных кривых

1

| Уровень дефектности | $S_{доп} = 3$ | $S_{доп} = 6$ |
|---------------------|---------------|---------------|
| 1e-04%              | —             | 0.83%         |
| 1e-03%              | —             | 5.73%         |
| 0.01%               | 0.03%         | 32.2%         |
| 0.1%                | 1.72%         | 88.7%         |
| 0.3%                | 11.3%         | 99.2%         |
| 1%                  | 58.2%         | 100%          |
| 5%                  | 100%          | —             |



Существующий порядок выполнения ОКР и порядок выполнения ОКР с учетом внедрения статистического контроля представлены на рисунке 7а и 7б соответственно.

В таблице 1 приведена разница вероятности пропуска дефектов в опытном производстве при введении комбинированного контроля, относительно существующего по альтернативному признаку.

#### Закключение

Существующие подходы и методы контроля не позволяют с достаточной вероятностью выявлять на этапе ЖЦП «Разработка» дефекты, имеющие относительно низкую вероятность возникновения из-за малого объема опытных образцов. При этом такие дефекты при серийном отказе образуют избыточную дефектность и требуют принятия мер по ремонту/доработке или разработке/доработке конструкции с учетом выявившихся отказов. Для повышения выявляемости таких дефектов необходимо совершенствование подходов и методов контроля на этапе ЖЦП «Разработка».

Одним из направлений совершенствования подходов и методов контроля на этапе ЖЦП «Разработка» является дополнение существующего контроля по альтернативному признаку, контролем по количественному признаку. Введение такого контроля позволяет существенно снизить вероятность ошибок 1-го рода при выполнении ОКР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, В. Б. Методы и средства обеспечения качества и надежности продукции предприятия интегрированной структуры оборонно-промышленного комплекса : диссертация ... кандидата технических наук : 2.5.22. / В. Б. Афанасьев; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; Диссовет У2.5.22.01]. – Москва, 2022. – 172 с.
2. Особенности информационного обеспечения статистического контроля качества оборонной продукции однократного применения при мелкосерийном производстве/ С. Н. Остапенко, В. М. Медведев, В. Б. Афанасьев и др. // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2022. – Спецвыпуск. С. 27 – 36.
3. Управление качеством в вертикально интегрированных структурах ОПК: Интеграция систем менеджмента качества и АСУТП / С.Н. Остапенко, Г.В. Палихов, В.Б. Протасьев, С.В. Юдин // Вестник ВКО. – 2019. – № 2(22). – С. 99 – 109.
4. Остапенко, С. Н. Статистический анализ подхода к контролю и оценке показателя «процент сдачи продукции с первого предъявления», являющегося основой для оценки результативности технологических систем предприятия / С. Н. Остапенко, О. А. Якунина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 435-440. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-435-436. – EDN OFHGDW.
5. Протасьев, В. Б. Логическая структура построения TQM и ее использование в задачах обеспечения качества / В. Б. Протасьев, Е. В. Плахотникова, И. В. Литвинова // Методы менеджмента качества. – 2015. – № 6. – С. 20-24. – EDN TUDRPF.
6. Клячкин, В. Н. Особенности диагностики технических систем с использованием мультиклассовой классификации / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 2(38). – С. 45-52. – DOI 10.21685/2307-4205-2022-2-5. – EDN YXIVPA.
7. Рязанский, В. П. Повышение точности и надежности показателей качества продукции посредством улучшения оценок параметров равномерного распределения / В. П. Рязанский, С. В. Юдин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 668-678. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-668-678. – EDN LMKLVV.
8. Управления качеством и надёжностью оборонной продукции на основе статистического анализа результатов параметрического контроля / В. Б. Афанасьев, И. И. Бухов, В. М. Медведев, Е. А. Калинин

// От качества инструментов к инструментам качества : Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Тула, 19-20 октября 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 204-209. – EDN IDRPBT.

9. Афанасьев, В. Б. Методика определения параметров контрольной карты усиленного размаха / В. Б. Афанасьев, С. А. Махлаенко, Е. В. Плехотникова, В. П. Рязанский // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-parametrov-kontrolnoy-karty-usilennogo-razmaha> (дата обращения 05.06.2025)

10. ГОСТ Р 50779.44-2001. Статистические методы. Показатели возможности процессов. Основные методы расчета : нац. стандарт Российской Федерации : изд. офиц. : принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 2 октября 2001 г. № 400-ст. : введен впервые / разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 125 «Статистические методы в управлении качеством продукции», Акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО НИЦ КД). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 15 с.

11. Ермолаев, В. А. Риски отказов сложных технических систем / В. А. Ермолаев, Н. К. Юрков, Ю. А. Романенко // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2014. – Т. 1. – С. 46-49. – EDN SPDHMT.

12. Информационные методы в управлении качеством / В.Г. Григорович, С.В. Юдин, Н.О. Козлова, В.В. Шильдин; Под общ. ред. В.Г. Григоровича. – Москва : РИА "Стандарты и качество", 2001. – 205 с. – ISBN 5-901397-03-7

13. Клячкин, В. Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса / В. Н. Клячкин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 196 с.

УДК 681.518.5

**Волков<sup>1</sup> А.В., Семенов<sup>2</sup> А.Д., Фадейкина<sup>3</sup> Т.Н.**

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2,3</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

<sup>1</sup> elsoldador@rambler.ru

<sup>2</sup> ad-semenov@mail.ru

### **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ НАТРИЕВЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

**Аннотация.** Повышение эффективности выходного контроля натриевых ламп высокого давления может быть достигнуто за счет интеллектуализации процесса контроля, обоснованного выбора контролируемых параметров, применения современных методов обработки данных и их архивирования. В связи с этим разработка информационно-алгоритмических структур и создание на их основе высокоэффективных систем контроля представляются актуальной задачей. Целью настоящего исследования является разработка методики повышения достоверности выходного контроля натриевых ламп высокого давления путем реализации интеллектуальной системы диагностики, основанной на нечеткой экспертной системе принятия решений, формализующей эвристические знания о параметрах контроля. Разработана математическая модель нечеткого многокритериального анализа качества ламп, основанная на синтезе адаптивных функций принадлежности для трёх критических параметров и построении нечетких продукционных правил 3-го порядка. Представленная система автоматизации приемочного контроля позволяет добиться с погрешностью  $\leq 1.5\%$  достоверности контроля основных параметров натриевых ламп высокого давления и снижения себестоимости контроля на 17–22%.

**Ключевые слова:** нечеткая экспертная система, допусковой контроль, нечеткая логика, нейросетевой анализ

**Volkov<sup>1</sup> A.V., Semenov<sup>2</sup> A.D., Fadeykina<sup>3</sup> T.N.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2,3</sup> National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

<sup>1</sup> elsoldador@rambler.ru

<sup>2</sup> ad-semenov@mail.ru

### **APPLICATION OF FUZZY EXPERT SYSTEM OF ADMISSION CONTROL FOR HIGH-PRESSURE SODIUM LAMPS**

**Abstract.** Improving the efficiency of output control of high-pressure sodium lamps can be achieved by intellectualizing the control process, making an informed choice of controlled parameters, and using modern data processing and archiving methods. Therefore, developing information and algorithmic structures and creating highly effective control systems based on them is an urgent task. The purpose of this research is to develop a methodology for improving the reliability of output control of high-pressure sodium lamps by implementing an intelligent diagnostic system based on a fuzzy expert decision-making system that formalizes heuristic knowledge about control parameters. A mathematical model of fuzzy multi-criteria analysis of lamp quality has been developed based on the synthesis of adaptive membership functions for three critical parameters and the construction of fuzzy production rules of the 3rd order. The presented system of acceptance control automation allows for achieving a reliability of control of the main parameters of high-pressure sodium lamps with an error of  $\leq 1.5\%$  and reducing the cost of control by 17–22%.

**Keywords:** fuzzy expert system, tolerance control, fuzzy logic, neural network analysis

#### **Введение**

Современные системы контроля качества натриевых ламп высокого давления (НЛВД) требуют внедрения интеллектуальных методов анализа, способных учитывать сложные взаимосвязи между их электрическими и светотехническими характеристиками. Традиционные подходы, основанные на жестких допусках для отдельных параметров, не всегда обеспечивают необходимую точность оценки из-за нелинейного характера взаимного влияния рабочих характеристик ламп.

В данной работе представлена разработка нечеткой экспертной системы для комплексного допускового контроля, использующей три ключевых параметра: напряжение на лампе, ток через лампу, световой поток.

Применение нечеткой логики позволяет учитывать нелинейные соотношения между электрическими и световыми параметрами, минимизировать погрешности классификации в "пограничных" областях допусков, автоматизировать процесс принятия решений о соответствии качества. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности выходного контроля на 7,5%, снижения доли ошибочной браковки на 27%, обеспечения стабильности светотехнических характеристик. Практическая значимость заключается в возможности интеграции системы в существующие технологические линии контроля с минимальными доработками.

Принцип реализации системы контроля

В настоящее время контроль параметров натриевых ламп осуществляется системой допускового контроля на предприятии ООО «Рефлекс-С». Лампы типа ДНаЗ производятся по сей день в различных модификациях. Они выпускаются в колбе, где горелка

размещается аксиально, то есть на геометрической оси отражателя. Широко распространены лампы торговых марок «Reflux», имеющие зеркалированную колбу специальной формы.

Процесс производства ламп представляет собой длинный технологический маршрут, который включает в себя такие этапы, как подготовка колб, проверка их на механическую прочность, зеркалирование колб. Параллельно с этим происходит изготовление деталей монтажа, ножки, цоколя. Затем производится сборка ламп, их проверка на механическую прочность.

После изготовления, как и любые другие источники света, перед отгрузкой потребителю эти лампы должны пройти процесс стендовых испытаний и разбраковки. Испытания заключаются во включении ламп на заданное время с контролем их параметров. Если измеренное значение не укладывается в необходимый диапазон, то лампа отбраковывается.

Расширение географии поставок комплектующих привело к снижению точности контроля из-за появления в поставках комплектующих некондиционной продукции. Это приводит к дестабилизации технологических процессов изготовления и контроля, что показано на графиках рисунка 1. В зависимости от типа поставок комплектующих (импортные или отечественные) закон распределения контролируемого параметра (падение напряжения на лампе) отличается от нормального. Исходя из выше сказанного была поставлена задача повышения точности контроля за счёт внедрения нечёткой экспертной системы интеллектуального контроля натриевых ламп высокого давления по их измеряемым параметрам и переменным.

Рассмотрим математическую модель натриевой лампы, построенную на основе уравнения, представленного в работе [1] с учетом уравнений, представленных в работах [2,3]. Она усовершенствована и будет применяться во всех последующих алгоритмах для идентификации параметров НЛВД. Полученное уравнение имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \frac{1}{L} \left[ U_s - \left( \frac{1}{x_2 x_3} + R \right) x_1 \right], \\ \frac{dx_2}{dt} &= A_l U_0^2 x_2^2 \frac{\left( \frac{x_1}{U_0 x_2 x_3} \right)^2 - 1}{1 + k_1 \left( \frac{|x_1|}{U_0 x_2 x_3} - 1 \right)}, \\ \frac{dx_3}{dt} &= \left[ k_2 + k_3 \left( \frac{|x_1|}{U_0 x_2 x_3} \right)^{k_4} \right] \left[ 1 + k_1 \left( \frac{|x_1|}{U_0 x_2 x_3} - 1 \right) - x_3 \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Данная модель описывается следующими параметрами и переменными.

Параметры:  $g_{\text{л}}$  – приведенная проводимость лампы, учитывающая среднее значение концентрации электронов;  $\beta$  – безразмерный коэффициент, изменяющийся во времени и учитывающий подвижность электронов;  $i_{\text{л}}$  – ток, протекающий через лампу;  $U_0$  – номинальное напряжение на лампе;  $A_l$  – коэффициент, определяемый конструкцией лампы;  $k_1$  –  $k_4$  – электрические коэффициенты, определяемые для конкретного типа лампы.

Переменные: где  $x_1$  – ток лампы;  $x_2$  – приведенная проводимость лампы, учитывающая среднее значение концентрации электронов;  $x_3$  – безразмерная величина, учитывающая подвижность электронов.

Результаты моделирования представлены на рисунке 2 (ток, напряжение, проводимость).

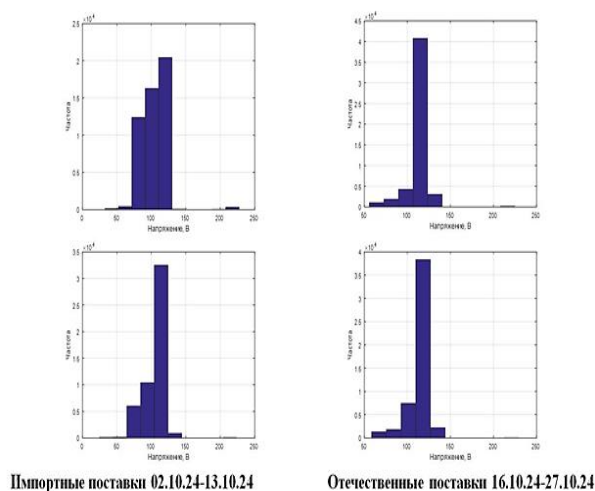
Структура нечёткой нейросетевой системы экспертного контроля состоит из: – нейросетевой системы определения параметров [4], – системы определения переменных, – системы оценки, – статистических переменных. Изменение параметров и переменных осуществляется системами нечёткого контроля [5]. Экспертная система контроля объединяет в себе нечёткие и нейросетевые системы.

Процедура определения параметров модели по методу резервуарных вычислений [6,7,8]. Дана математическая модель динамической нелинейной системы, представленная в виде выражения (2)

$$F(x, \dot{x}, y, u, \theta) = 0, \quad (2)$$

где  $x, \dot{x}$  – векторы переменных состояния и их производные,  $y, u$  – векторы выходных и входных переменных,  $\theta$  – вектор параметров модели.

На математической модели варьированием параметров  $\theta$  проводится эксперимент (например, полнофакторный эксперимент  $2N$ , где  $N$  – размерность вектора  $\theta$ ) и формируется выборка параметров модели  $\theta$  и обучающая выборка переменных для построения имитационных моделей с массивом входов  $P_d$  и массивом выходов  $T_d$ .



Импортные поставки 02.10.24-13.10.24

Отечественные поставки 16.10.24-27.10.24

Рисунок 1 – Графики закона распределения поставляемых компонентов

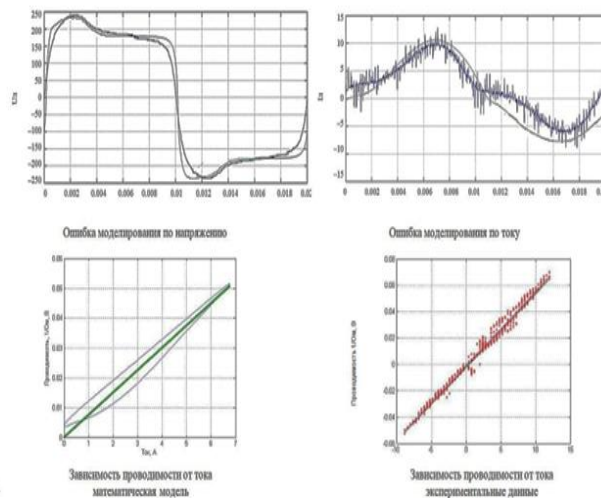


Рисунок 2 – Результаты моделирования (ток, напряжение, проводимость)

$$P_d = [X, Y, U];$$

$$T_d = Y;$$

$$X = X(t); Y = Y(t); U = U(t),$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $U$  – массивы данных, включающие все переменные модели, полученные в каждом из  $N$  – опытов плана эксперимента. На выборке  $P_d$ ,  $T_d$  осуществляется построение имитационной модели и формируется матрица параметров имитационной модели  $W_d$ . Формируется новая обучающая выборка для обучения статической нейронной сети (радиальной базисной сети или многослойной сети прямой передачи), отображающей матрицу параметров  $W_d$  в вектор параметров  $\theta$ .

$$P_c = W_d;$$

$$T_c = \theta,$$

где  $\theta$  – массив параметров модели (2), полученный в результате спланированного эксперимента. Проводится обучение статической сети и вычисляется оценка вектора параметров  $\theta$  исходной модели (2). Сравнение моделей проводится по максимальной относительной ошибке моделирования.

$$em = \sup (\theta - \hat{\theta})$$

Нейросетевая модель строится на основе двухслойной динамической нейронной сети прямой передачи с линейными функциями активации. Для обучения использовался алгоритм Левенеберга – Марквардта, регуляризованный по Байесу. Модель характеризуется 13 параметрами, ошибка моделирования практически нулевая.

На рисунке 3 показана Нечёткая система контроля переменных лампы (напряжение на лампе, ток, освещённость).

Для реализации данной системы использовался пакет Fuzzy Logic Toolbox в среде MATLAB, который является мощным инструментом для проектирования, моделирования и анализа нечетких логических систем.

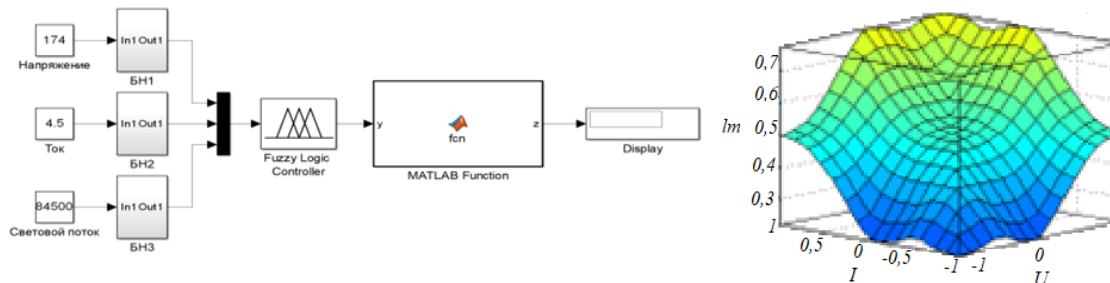


Рисунок 3 – Нечёткая система контроля переменных НЛВД

Он позволяет применять методы нечеткой логики для решения задач, связанных с неопределенностью, приближенными рассуждениями и управлением сложными системами. Основным алгоритмом нечеткой системы контроля переменных НЛВД является алгоритм Мамдани [4].

#### Заключение

В ходе проведенного исследования был сделан анализ методов контроля и испытаний электрических параметров газоразрядных натриевых ламп высокого давления.

Установлено, что повышение достоверности контроля возможно за счет обоснованного выбора контролируемых параметров. Разработаны аналитические модели натриевой лампы, включающие дифференциальные уравнения, модели проводимости и нейросетевые методы. Параметры этих моделей предложено использовать в качестве контролируемых переменных для повышения точности контроля. Сформирована структура нечёткой нейросетевой системы экспертного контроля, обеспечивающая интеллектуальную обработку данных и принятие решений. Разработана процедура определения параметров модели на основе методов нечеткого контроля, что позволило повысить эффективность обработки динамических параметров лампы. Созданы нейросетевые системы для определения параметров лампы, анализа переменных величин и оценки их статистических характеристик, что обеспечило комплексный подход к контролю качества. Разработана и внедрена в производство автоматизированная система контроля качества натриевых ламп. Система позволяет в режиме реального времени отслеживать параметры технологического процесса, архивировать данные и проводить их последующий анализ. Проведенные исследования и внедренные разработки способствуют повышению точности контроля, надежности диагностики и эффективности производства газоразрядных натриевых ламп высокого давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харченко В.Ф. Модифицированная модель нестационарных режимов разрядной лампы высокого давления с индуктивным балластом / В.Ф. Харченко, А.А. Якунин // Світлотехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2 (30). – С.4-12.
2. Харченко В. Ф. Разработка компьютерной модели для разрядной лампы высокого давления / В. Ф. Харченко, В. Г. Ягуп, А. А. Якунин [и др.] // Світлотехніка та електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 52-57.
3. Hooker J.D. The low-pressure sodium lamp / J.D. Hooker // Plasma Science, IEEE Conference Record – Abstracts. – 1997. – P. 289.
4. Нечеткая логика : учебно-методическое пособие / составители Д. В. Полупанов, С. Р. Абдюшева. – Уфа : БашГУ, 2020. – 84 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/179916>.
5. Бакулева, М. А. Нечёткая логика и мягкие вычисления : учебное пособие / М. А. Бакулева, В. П. Корячко, В. И. Орешков. – Рязань : РГРТУ, 2016. – 64 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/168070>
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680790 Российская Федерация. Разработка программного комплекса для обработки сигнала ЭКГ на основе резервуарных вычислений: № 2024665493 : заявл. 07.07.2024 : опубл. 03.09.2024 / В. Д. Лапшина, А. Д. Семенов, О. В. Ермилина. – EDN JZDOUB.
7. Семенов, А. Д. Нейросетевая параметрическая идентификация нелинейных динамических моделей / А. Д. Семенов, А. В. Волков, Е. Д. Семяхина // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения – 2021") : Материалы XIII Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых, Пенза, 28-30 октября 2021 года / Под редакцией Е.А. Печерской. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2021. – С. 73-79.
8. Волков, А. В. Параметрическая идентификация нелинейной модели на примере натриевой лампы высокого давления / А. В. Волков, А. Д. Семенов, Е. Д. Семяхина // Огарёв-Online. – 2021. – № 14(167).



УДК 681.518.5

**Волков<sup>1</sup> А.В., Семенов<sup>2</sup> А.Д., Фадейкина<sup>3</sup> Т.Н.**

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2,3</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

<sup>1</sup> elsoldador@rambler.ru

<sup>2</sup> ad-semenov@mail.ru

## **РЕЗЕРВУАРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ КАК МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ**

**Аннотация.** Параметрическая идентификация сложных нелинейных динамических систем, таких как системы выходного контроля натриевых ламп высокого давления, представляет собой актуальную задачу. Традиционные методы часто оказываются недостаточно эффективными для построения точных моделей и прогнозирования ключевых параметров работы таких систем в режиме реального времени. Целью исследования является разработка метода параметрической идентификации нелинейной системы натриевой лампы высокого давления с использованием подхода резервуарных вычислений (Reservoir Computing). Метод направлен на создание эффективной модели для оценки и прогнозирования критических выходных параметров системы. На основе резервуарных вычислений разработана нелинейная динамическая модель системы. Модель демонстрирует высокую способность к обучению и идентификации скрытых зависимостей между входными воздействиями и выходными параметрами лампы. Для принятия решений на основе прогнозов модели реализован интеллектуальный блок, формализующий экспертные знания. Предложенный подход позволяет с высокой точностью (погрешность  $\leq 1.5\%$ ) идентифицировать и прогнозировать ключевые параметры работы ламп, что обеспечивает повышение достоверности автоматизированного выходного контроля и может привести к снижению его себестоимости на 17–22%.

**Ключевые слова:** резервуарные вычисления, параметрическая идентификация, нелинейные динамические системы, прогнозирование временных рядов, натриевые лампы высокого давления, интеллектуальная диагностика

**Volkov<sup>1</sup> A.V., Semenov<sup>2</sup> A.D., Fadeykina<sup>3</sup> T.N.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2,3</sup> National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

<sup>1</sup> elsoldador@rambler.ru

<sup>2</sup> ad-semenov@mail.ru

## **TANK CALCULATIONS AS A METHOD FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION OF NONLINEAR SYSTEMS**

**Abstract.** Parametric identification of complex nonlinear dynamic systems, such as high-pressure sodium output control systems, is an urgent task. Traditional methods are often not effective enough to build accurate models and predict the key parameters of such systems in real time. The purpose of the study is to develop a method for parametric identification of a non-linear high-pressure sodium lamp system using the Reservoir Computing approach. The method aims to create an effective model for estimating and predicting critical system output parameters. Based on reservoir calculations, a non-linear dynamic model of the system has been developed. The model demonstrates a high ability to learn and identify latent dependencies between input influences and output parameters of the lamp. To make decisions based on the forecasts of the model, an intellectual block is implemented that formalizes expert knowledge. The proposed approach makes it possible to identify and predict the key parameters of lamp operation with high accuracy (error  $\leq 1.5\%$ ), which increases the reliability of automated output control and can lead to a decrease in its cost by 17–22%.

**Keywords:** tank computation, parametric identification, nonlinear dynamical systems, time series prediction, high pressure sodium lamps, intelligent diagnostics

### **Введение**

Параметрическая идентификация нелинейных систем на основе резервуарных вычислений является современным подходом, который сочетает в себе элементы теории динамических систем и машинного обучения. Резервуарные вычисления – это процедура исследования нелинейных систем заключающаяся в обучении рекуррентной динамической нейронной сети и последующем считыванием состояния динамической нейронной сети (резервуара) статической нейронной сетью.

Повышение достоверности идентификации сложных динамических систем достигаются путём использования нейросетевых технологий и резервуарных вычислений. С учетом растущего интереса к данным и машинному обучению, этот подход имеет потенциал для дальнейшего развития и применения в различных областях науки и техники.

### **Принцип реализации гибридной схемы**

В качестве объекта параметрической идентификации использовалось система контроля натриевых ламп высокого давления. Контроль годности НЛВД на установке карусельного типа [1,2]. При которой контролируется напряжения на лампе и при выходе этого напряжения за допустимые границы лампа бракуется. Сложность конструкции лампы, взрывоопасность и наличие паров ртути, требуют повышенных мер контроля. Была поставлена задача повышения достоверности контроля путем реализации многомерного, многоальтернативного, статистического контроля с использованием нейронных сетей, нечеткой логики на основе резервуарных вычислений [3,4].

Процедура обучение нейронных сетей по методу резервуарных вычислений представлена на рисунке 1. На математической модели варьированием параметров  $\theta = [k_1, k_2, k_3, k_4]^T$  проводится вычислительный эксперимент (например, полнофакторный эксперимент  $2^N$ , где  $N$  – размерность вектора  $\theta$ ) и формируется выборка параметров модели  $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ . В таблице 1 представлен план эксперимента и указаны значения параметров модели. Параметры модели  $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$  преобразуются во входные и выходные переменные модели  $X = X(t)$ ;  $Y = Y(t)$ ;  $U = U(t)$ .

По входным параметрам  $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$  и выходным переменным модели  $X = X(t)$ ;  $Y = Y(t)$ ;  $U = U(t)$ , производится обучение рекуррентной нейронной сети. В результате обучения формируется матрица синаптических коэффициентов нейронной сети (резервуар)  $Wd$ . Выход резервуара соединен со считывателями, в качестве считывателей используется статическая обучающая машина с простыми алгоритмами обучения (на пример радиальная базисная сеть). Выход считывателя является оценкой параметров исходной математической модели натриевых ламп. Далее проводится обучение статической нейронной сети и вычисляется оценка вектора параметров  $\hat{\theta}$  исходной модели. Сравнение параметров и их оценки проводится по максимальной относительной ошибке моделирования  $em = \sup(\theta - \hat{\theta})$ .

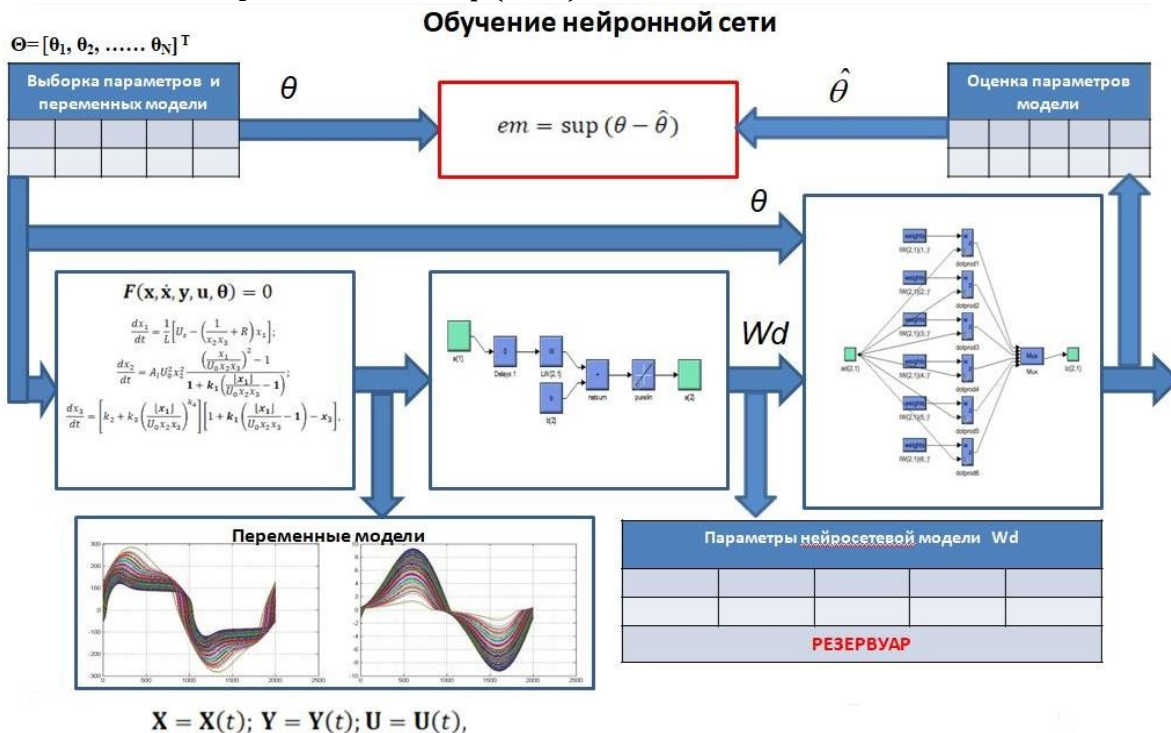


Рисунок 1 – Процедура обучение нейронных сетей по методу резервуарных вычислений

Следующим шагом является процедура определения параметров модели по методу резервуарных вычислений рисунок 2. После того как нейронные сети обучились, выполняется определение параметров. Для этого подаём на вход обученной динамической нейронной сети переменные реального объекта (в нашем случае это ток через лампу и напряжение на ней).

План эксперимента

Таблица 1

| № опыта/ переменная | U0       | A1     | K1     | K2×104 | K3×104 | K4     |
|---------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1                   | 136,2374 | 5,5335 | 0,6680 | 1,5546 | 3,2885 | 1,5107 |
| 2                   | 135,7986 | 5,5887 | 0,6029 | 1,6960 | 3,0672 | 1,5979 |
| 3                   | 147,5063 | 5,5083 | 0,6133 | 1,5694 | 3,1564 | 1,5831 |
| 4                   | 145,7572 | 5,5269 | 0,6423 | 1,7191 | 3,3771 | 1,5418 |
| 5                   | 148,1105 | 5,5645 | 0,6376 | 1,5764 | 3,1713 | 1,5482 |
| 6                   | 131,4503 | 5,5425 | 0,6313 | 1,5646 | 3,0715 | 1,5423 |
| 7                   | 139,4691 | 5,5091 | 0,6266 | 1,5615 | 3,1124 | 1,5440 |
| 8                   | 131,1343 | 5,5602 | 0,6387 | 1,8664 | 3,0005 | 1,5462 |
| 9                   | 136,7500 | 5,5091 | 0,6576 | 1,7733 | 3,2186 | 1,5426 |
| 10                  | 143,2692 | 5,5582 | 0,6541 | 1,8480 | 3,1059 | 1,5318 |

Затем переменные реального объекта обрабатываются, обученной динамической нейронной сетью (резервуаром). В дальнейшем полученные синоптические коэффициенты динамической нейронной сети подаем, на вход статической нейронной сети, где и происходит оценка вектора параметров исходной модели. Совпадение результатов идентификации с входными параметрами объекта.

### Параметрическая идентификация

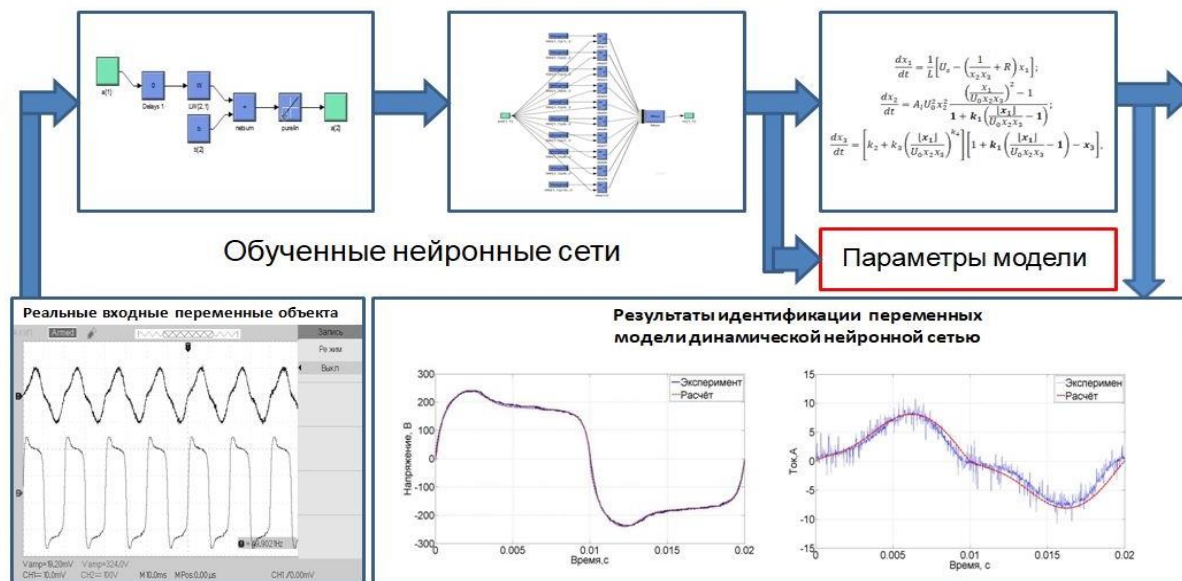


Рисунок 2 – Процедура определения параметров модели по методу резервуарных вычислений

В качестве резервуара в нашем случае использовалась двухслойная рекуррентная нейронная сеть с линейными функциями активации, обучение сети проводилось по алгоритму Левенберга-Маркварта регуляризованному по Байесу [5,6]. В результате обучения нейронной сети формируется матрица синаптических коэффициентов нейронной сети (резервуар). Выход резервуара соединен со считывателями, в качестве считывателей используется статическая нейронная сеть с простыми алгоритмами обучения в нашем случае это радиальная базисная нейронная сеть [7,8]. Далее проводится обучение статической сети и вычисляется оценка вектора параметров  $\theta$  исходной модели.

Сравнение параметров и их оценки проводится по максимальной относительной ошибке моделирования. Максимальные ошибки вычисления параметров модели не превышает 11,2 %.

### Заключение

В результате проведенного исследования были получены следующие ключевые результаты. Был проведен комплексный анализ существующих методов контроля и испытаний сложных динамических систем на примере натриевых ламп высокого давления. Анализ выявил высокий практический потенциал по сравнению с традиционными подходами и подтвердил актуальность задачи повышения достоверности выходного контроля за счет интеллектуальной параметрической идентификации и обоснованного выбора контролируемых параметров. Разработанный алгоритм параметрической идентификации на основе резервуарных вычислений показал высокую эффективность для реализации нелинейных моделей динамики и прогнозирования ключевых параметров системы. Наиболее значимым практическим результатом работы является разработка и успешное внедрение на производстве ООО «Рефлекс-С» интеллектуальной автоматизированной системы контроля качества. Предложенный подход позволяет не только повысить точность и достоверность диагностики, но и оптимизировать экономические затраты на контрольные операции, что подтверждает высокий практический потенциал использования методов машинного обучения, в частности резервуарных вычислений, для задач промышленной идентификации сложных технических систем. Перспективы дальнейших исследований заключаются в адаптации разработанного алгоритма для других типов сложных динамических объектов, а также в оптимизации архитектуры резервуара для работы в режиме онлайн-обучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов, А. Д. Многоуровневый контроль параметров натриевых ламп высокого давления / А. Д. Семенов, А. В. Волков, К. А. Валынцева // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения – 2020») : материалы XII Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых, Пенза, 16-18 марта 2020 года / под ред. Е. А. Печерской. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2020. – С. 141-145.

2. Семенов, А. Д. Нейросетевая параметрическая идентификация нелинейных динамических моделей / А. Д. Семенов, А. В. Волков, Е. Д. Семяхина // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2022») : материалы XIV Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для обучающихся и молодых ученых, Пенза, 24–26 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2022. – С. 138–140.
3. Volkov, A. V. The Reiterated Neural Network Parametric Identification of Nonlinear Dynamic Models of Objects / A. V. Volkov, A. D. Semenov, B. A. Staroverov // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 857 LNEE. – P. 34–42. – DOI 10.1007/978-3-030-94202-1\_4. – EDN XWEJTG.
4. Нейросетевая параметрическая идентификация модели вихретокового датчика с использованием системы резервуарных вычислений / О. В. Ермилина, А. Д. Семенов, С. В. Абрамов, В. П. Маланин // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76, № 11. – С. 517–523. – DOI 10.36652/0869-4931-2022-76-11-517-523.
5. Кунин, А. С. Применение резервуарных сетей, заданных графом тесного мира, в обучении с подкреплением / А. С. Кунин, О. Ю. Никитин, О. А. Лукьянова // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Хабаровск, 14–16 сентября 2021 года / Редколлегия: Р.В. Намм (отв. редактор) [и др.]. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2021. – С. 166–169. – EDN HQKPSA.
6. Кулагин, Н. Д. Анализ влияния размера рекуррентной нейронной сети на точность моделирования и предсказания динамики стохастического нейрона Фитцхью-Нагумо / Н. Д. Кулагин, А. В. Андреев, А. Е. Храмов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2025. – Т. 89, № 3. – С. 498–502. – DOI 10.31857/S0367676525030284. – EDN FUODPS.
7. Измаилов, А. Ф. Метод Левенберга-Марквардта для задач безусловной оптимизации / А. Ф. Измаилов, А. С. Куренной, П. И. Стецюк // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – Т. 24, № 125. – С. 60–74. – DOI 10.20310/1810-0198-2019-24-125-60-74. – EDN ZGYWTV.
8. Васин, В. В. Метод Левенберга – Марквардта и его модифицированные варианты для решения нелинейных уравнений с приложением к обратной задаче гравиметрии / В. В. Васин, Г. Я. Пересторонина // Труды института математики и механики УрО РАН. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 53–61. – EDN PVBHKZ.

УДК 658.71, 004.9, 004.6

**Боков<sup>1</sup> А.А., Аитов<sup>2</sup> А.Ш., Куразов<sup>3</sup> А.А., Данилова<sup>4</sup> Е.А.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ**

**Аннотация.** Представлен метод анализа характеристик переходных отверстий высокоскоростных многослойных плат. Проанализировано и охарактеризовано влияние радиуса металлизированного отверстия, размера изолирующего зазора и расстояния до соседних шунтирующих отверстий. Приведены рекомендации по выбору значений параметров, подтвержденные результатами трехмерного моделирования методом конечных элементов. Предлагается методика, при которой структуры переходного отверстия и достаточного количества шунтирующих переходов можно аппроксимировать как коаксиальную линию передачи. Данный подход позволяет оптимизировать геометрические параметры конструкции и определить их влияние на полосу пропускания.

**Ключевые слова:** переходное отверстие, многослойная печатная плата, высокоскоростной сигнал, шунтирующие отверстия, коаксиальная линия передачи, электромагнитное моделирование, согласование импеданса

**Bokov<sup>1</sup> A.A., Aitov<sup>2</sup> A.Sh., Kurazov<sup>3</sup> A.A., Danilova<sup>4</sup> E.A.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

## **OPTIMIZATION OF CALCULATIONS OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF TRANSITION HOLES IN HIGH-SPEED MULTILAYER PRINTED CIRCUITS BASED ON COAXIAL APPROXIMATION**

**Abstract.** The paper presents a method for analyzing the characteristics of transition holes in high-speed multilayer circuit boards. The influence of the radius of the metallized hole, the size of the insulating gap, and the distance to neighboring shunt holes is analyzed and characterized. Recommendations for selecting parameter values are provided, based on the results of three-dimensional finite element modeling. The paper proposes a method where the structure of the transition hole and a sufficient number of shunt transitions can be approximated as a coaxial transmission line. This approach allows you to optimize the geometric parameters of the design and determine their effect on the bandwidth.

**Keywords:** transition hole, multilayer printed circuit board, high-speed signal, shunt holes, coaxial transmission line, electromagnetic simulation, impedance matching

Введение. Металлизированные отверстия являются не только основным вариантом межслойного перехода многослойных высокоскоростных печатных плат [1], но и одним из главных источников неоднородностей в линии передачи.

В связи с возрастанием рабочих частот, выдвигаются требования к проектированию переходных отверстий, которые могут обеспечить передачу такого сигнала. Проектирование переходного отверстия, работающего в диапазоне нескольких гигагерц, представляет собой актуальную инженерную задачу. Например, в работе [3] предложена аналитическая модель переходного отверстия до 40 ГГц, однако в ней не учитываются шунтирующие переходные отверстия. Такое упрощение, с одной стороны, облегчает аналитическое решение и позволяет достичь необходимого согласования, однако с другой стороны реальная полоса пропускания оказывается значительно ниже из-за отсутствия шунтирующих переходных отверстий, а как следствие, не имеет практической ценности. Целью данной статьи является упрощение модели переходного отверстия, через которое проходит сигнал и шунтирующих отверстий до хорошо изученной коаксиальной линии передачи. В работе проводится сравнение полученной модели с результатами решения методом конечных элементов (CST MicrowaveStudio).

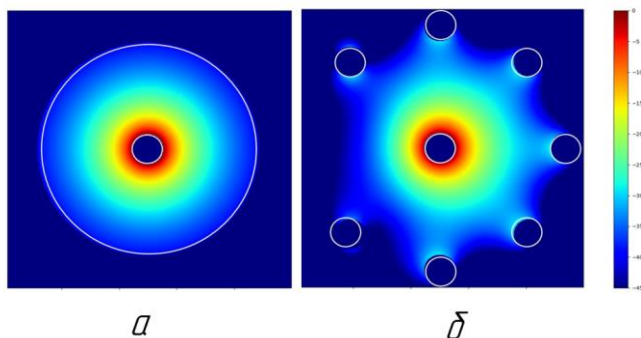


Рисунок 1 – Сравнение электрического поля в логарифмическом масштабе:  
а – коаксиальная линия передачи; б – структура из сигнального переходного  
отверстия и 7 шунтирующих

Предлагаемая модель аппроксимации. Как видно из рисунка 1, структура перехода коаксиальной линии передачи и сигнального переходного отверстия с шунтирующими отверстиями схожи, при условии достаточного количества шунтирующих переходных отверстий, равномерно расположенных вокруг центрального сигнального перехода. Как следствие, схожи и их электромагнитные характеристики.

Радиус изолирующего зазора  $a$  выбирается равным расстоянию от центра сигнального переходного отверстия (радиусом  $a$ ) до шунтирующих переходных отверстий такого же радиуса (рисунок 2, 3).

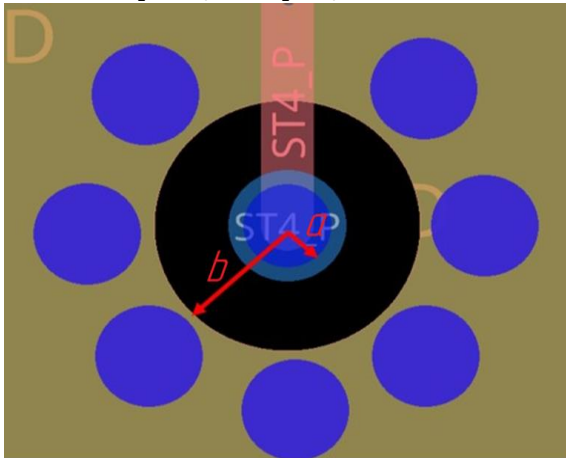


Рисунок 2 – Структуры переходного отверстия

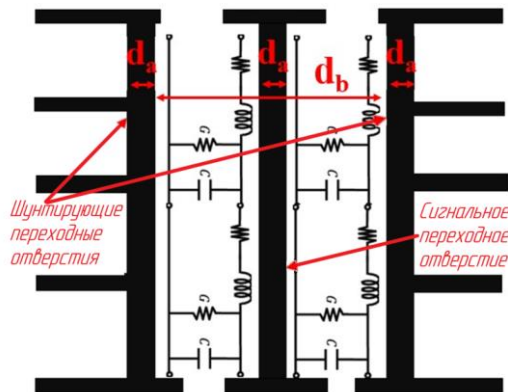


Рисунок 3 – Поперечное сечение предложенной структуры ( $d_a$  – диаметр переходного отверстия и  $d_b$  – диаметр изолирующего зазора)

Два основных параметра коаксиальной линии передачи – волновое сопротивление и частота отсечки. Согласно [2], волновое сопротивление определяется следующим образом:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}{2\pi} \quad (1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$a$  – внутренний радиус (радиус переходного отверстия);

$b$  – внешний радиус (радиус изолирующего зазора).

При выборе радиуса переходного отверстия одной из главных задач является обеспечение того, чтобы структура поддерживала только ТЕМ-моды. Для коаксиальной линии передачи частота отсечки высших мод определяется следующим образом:

$$f_c = \frac{ck_c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме

$\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита;

$k_c$  – волновое число отсечки, которое приблизительно равно:

$$k_c = \frac{2}{a+b} \quad (3)$$

Уравнение (2) даёт приближённое значение частоты отсечки. Более точный результат может быть получен путём решения уравнения Гельмгольца в цилиндрических координатах, решение которого выражается через функции Бесселя. Однако при учёте граничных условий получающееся характеристическое уравнение для определения  $k_c$  должно решаться численно [2].

Исходя из производственных ограничений, примем радиус изолирующего зазора, равным 0,75 мм, диаметр переходного отверстия – 0,2 мм, а относительную диэлектрическую проницаемость стеклотекстолита  $\epsilon_r = 3,62$  (стандартное значение для высокочастотного материала). Данная конфигурация дает волновое сопротивление  $Z_0 = 42,5$  Ом (1) и частоту отсечки  $f_c = 109$  ГГц (2).

Моделирование в CST StudioSuite

На рисунке 4 показана геометрия перехода, выходящего в полосковую линию передачи. В целях наглядности опорные слои скрыты, и отображены только шунтирующие, сигнальные переходные отверстия и полосковая линия, при этом диэлектрические слои показаны прозрачными.

На рисунке 5 представлен результат моделирования  $S$ -параметров описанной выше структуры переходного отверстия. Передача сигнала полностью исчезает на частоте около 112 ГГц, что очень близко к рассчитанному по (2) частоте отсечки  $f_c = 109$  ГГц. Относительная погрешность составляет порядка 3%.



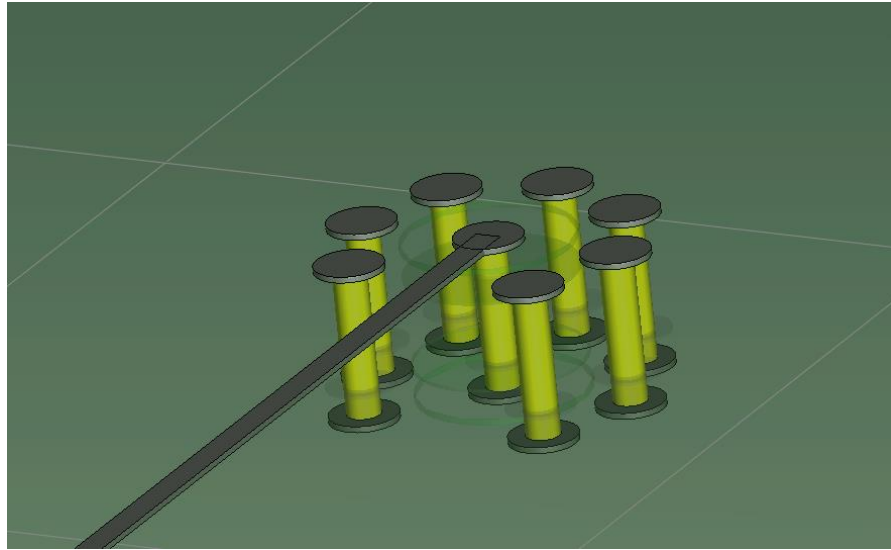


Рисунок 4 – Трехмерное изображение моделируемой структуры

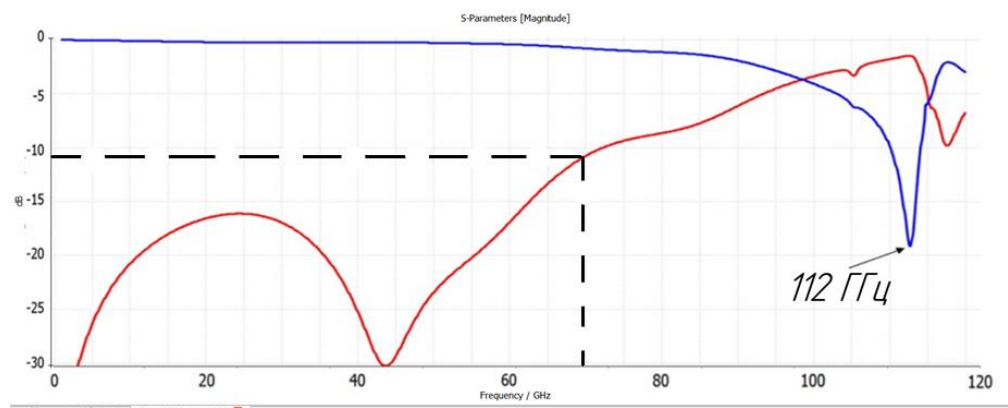


Рисунок 5 –  $S$ -параметры рассматриваемой структуры ( $S_{11}$  – красный,  $S_{21}$  – синий)

Несмотря на высокую частоту отсечки (112 ГГц),  $S_{11}$  параметр достигает уровня -10 дБ уже на частоте 70 ГГц, что означает значительно меньшую эффективную полосу пропускания, чем можно было бы ожидать, исходя лишь из частоты отсечки.

Для решения этой проблемы и расширения эффективной полосы пропускания можно уменьшить размер изолирующего зазора на внутренних слоях. Это существенно повышает частоту отсечки, обеспечивая более интенсивное ослабление нежелательных частот. Однако очевидный недостаток такого подхода – возникновение множественных отражений и повышение класса точности при производстве платы.

На рисунке 6 показано сравнение  $S_{11}$ -параметров при изменении радиуса изолирующего зазора на внутренних слоях с 0,75 мм до 0,5 мм. Такое изменение даёт выигрыш в эффективной полосе пропускания около 15 ГГц.

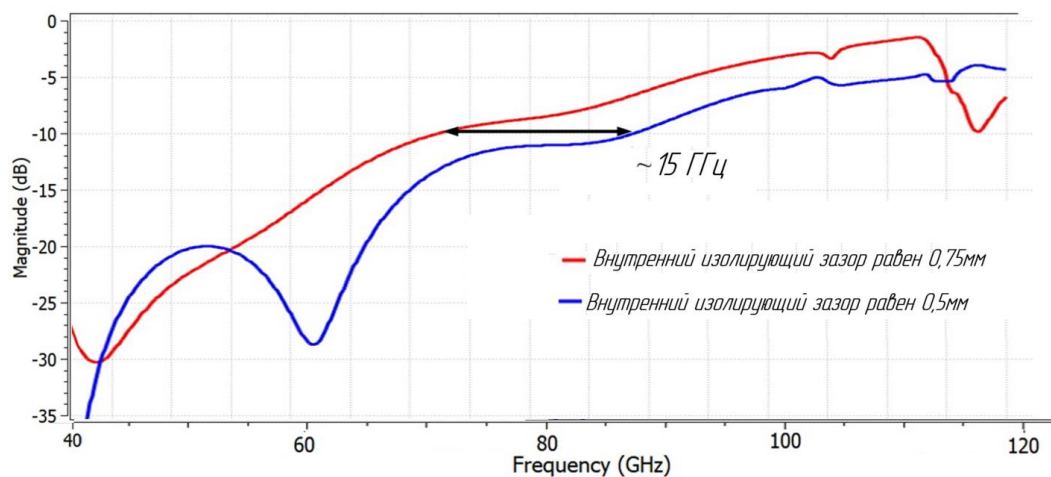


Рисунок 6 – Значения  $S_{11}$ -параметров при разных значениях радиуса изолирующего зазора

Согласно [4] чтобы повысить частоту отсечки перехода, его геометрические размеры должны быть малы по сравнению с длиной волны. Уменьшение радиуса переходного отверстия повышает частоту отсечки, однако одновременно изменяет волновое сопротивление эквивалентной коаксиальной структуры, что, в свою очередь, негативно сказывается на полосе пропускания из-за рассогласования.

Рассмотрим стандартные диаметры 0,1 мм, 0,15 мм и 0,25 мм, получим соответствующие волновые сопротивлениям приближённой коаксиальной модели 62 Ом, 42,5 Ом и 36 Ом соответственно. Размеры изолирующего зазора, расположение и количество шунтирующих переходов остаются неизменными и совпадают с параметрами, использованными выше. Волновое сопротивление линии передачи, в которую выходит переход, составляет 42,

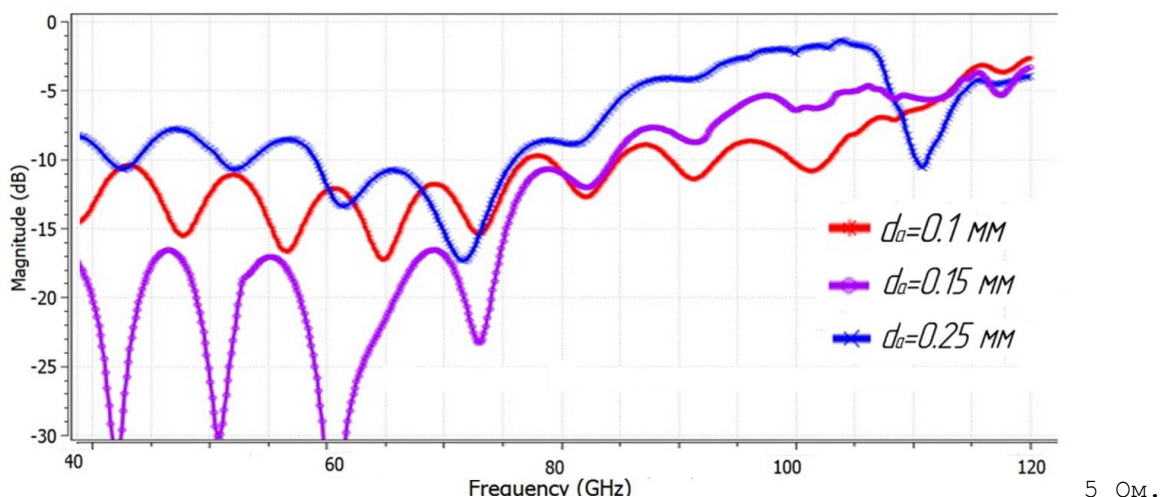


Рисунок 7 – $S_{11}$ -параметры. переходных отверстий различных диаметров

Наилучшее согласование достигается при диаметре переходного отверстия, при котором волновое сопротивление отверстия совпадает с импедансом полосковой линии (0,15 мм), следует также отметить, что переходное отверстие диаметром 0,1 мм демонстрирует лучшую производительность выше 85 ГГц. Причина заключается в том, что, несмотря на рассогласование, его частота отсечки выше, и влияние высших мод проявляется на более высоких частотах.

Анализ во временной области (в частности, временная рефлектометрия (TDR) позволяет понять характер неоднородностей переходного отверстия. При проектировании печатной платы требуется минимизировать неоднородности: переходное отверстие не должно иметь индуктивных пиков или ёмкостных провалов на TDR-кривой.

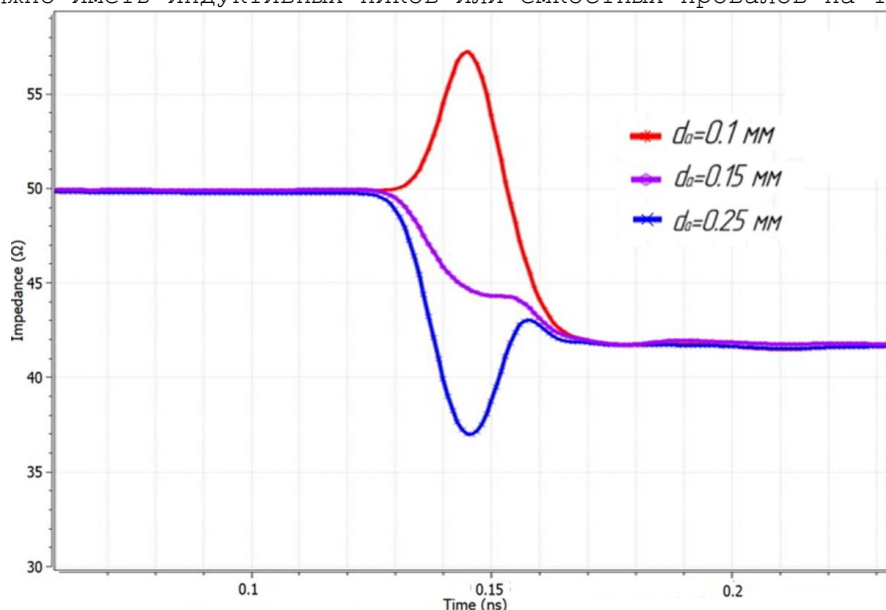


Рисунок 8 –Временная рефлектометрия (TDR) для тех же вариантов перехода

Если диаметр переходного отверстия выбран так, что волновое сопротивление ниже импеданса полосковой линии, переход ведёт себя как ёмкостная неоднородность – это проявляется в виде провала на TDR. Пик на TDR характеризует индуктивный характер неоднородности. Наименьшую неоднородность имеет согласованное с линией передачи переходное отверстие диаметром 0,15 мм



Следует отметить, что выбор конфигурации переходных отверстий является результатом решения целого комплекса задач: следует учитывать не только электромагнитные характеристики (согласование соседних участков цепи по волновому сопротивлению, частоту отсечки), но и технологические и конструкторские ограничения – плотность разводки, количество слоев, толщина платы и т.д. Незначительное улучшение электромагнитных характеристик может привести к многократному увеличению стоимости производства печатной платы. Поиск оптимального решения этой проблемы приводит к компромиссному решению, с той или иной стороны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53386-2009. Платы печатные термины и определения.
2. ГОСТ 23752-79. Платы печатные общие технические условия.
3. ГОСТ IEC61188-1-2- 2013. Общие требования Контролируемое волновое сопротивление
4. Джонсон, Г. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии / Г. Джонсон, М. Грэхем; пер. с англ. под ред. А. В. Батурина. – М.: Техносфера, 2009. – 688 с. – ISBN 978-5-94836-196-4.
5. Алмашкина, Н. С. К проблеме обеспечения качества металлизации отверстий / Н. С. Алмашкина, Е. А. Данилова // Полупроводниковые материалы в современной микро- и нанoeлектронике : Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти д.ф.-м.н., профессора Б.А. Билалова, Махачкала, 23-24 ноября 2020 года. – Махачкала: Типография ФОРМАТ, 2020. – С. 47-51.
6. Дударев Н. В. Использование переходных отверстий и перемычек в линиях ВЧ и СВЧ тракта // Инновационная наука. 2016. №10-2.
7. Данилова, Е. А. Исследование финишных защитных покрытий печатных плат / Е. А. Данилова, М. А. Нелюцков, Д. Е. Тузова // Инжиниринг и технологии. – 2022. – Т. 7, № 2. – С. 18-26.
8. Технология нанесения жидких паяльных масок / Н. С. Потешкина, Е. А. Данилова, Н. К. Юрков [и др.] // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2019. – Т. 2. – С. 298-300.
9. Fan J., Ye X., Kim J., Archambeault B., Orlandi A. Signal Integrity Design for High-Speed Digital Circuits: Progress and Directions // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52, no. 2. – P. 392-400.
10. Pozar D. M. Microwave Engineering. – 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
11. Воков, А. А. Влияние конструкции стека печатной платы на целостность сигнала / А. А. Воков, Е. А. Данилова // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2025. – Т. 2. – С. 428-431.
12. Rimolo-Donadio R., et al. Physics-Based Via and Trace Models for Efficient Link Simulation on Multilayer Structures Up to 40 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – Vol. 57, no. 8. – P. 2072-2083.

УДК 378.14

**Боков<sup>1</sup> А.А., Аитов<sup>2</sup> А.Ш., Данилова<sup>3</sup> Е.А.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

### **СРАВНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ТОРЦОВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ И ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ НА КАЧЕСТВО ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ**

**Аннотация.** Металлизация торцов печатных плат и «прошивка» из переходных отверстий, соединяющих земляные слои, представляют собой два распространённых способа обработки кромок многослойных печатных плат для подавления электромагнитных помех. Одним из критических параметров для переходных отверстий является шаг между ними. Для обеспечения торцевой металлизации в составе групповой заготовки необходимо учитывать наличие технологических перемычек, ведущих к отсутствию металлизации торца в местах их размещения, вследствие чего в таком покрытии необходим технологический разрыв. В данной работе исследуется эффективность экранирования для обоих случаев. Путём изменения шага переходных отверстий и длины каждого металлизированного участка кромки проведено сравнение эффективности экранирования для различных конфигураций.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, металлизированные торцы, эффективность экранирования, многослойные печатные платы, переходные отверстия

**Bokov<sup>1</sup> A.A., Aitov<sup>2</sup> A.Sh., Danilova<sup>3</sup> E.A.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

### **COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF METALIZATION OF THE PCB ENDINGS AND TRANSITION HOLES ON THE QUALITY OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE PROTECTION**

**Abstract.** Metallization of the PCB ends and "stitching" from the transition holes connecting the earthen layers are two common methods of processing the edges of multilayer printed circuit boards (MCPCBs) to suppress electromagnetic interference (EMI). One of the critical parameters for the transition holes is the spacing between them. To ensure the end metallization as part of a group blank, it is necessary to take into account the presence of technological bridges, which lead to the absence of metallization at the end in the places where they are located. As a result, a technological gap is required in such a coating. In this work, the shielding efficiency for both cases is investigated. By changing the pitch of the through-holes and the length of each metallized edge section, the shielding efficiency for different configurations is compared.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, metallized ends, shielding efficiency, multilayer printed circuit boards, through-holes

Введение. Для современных электронных систем, даже при оптимальной компоновке стека печатной платы, применении дифференциальной передачи сигналов и фильтрации синфазных помех на интерфейсных линиях, выполнение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) без применения дополнительного экранирования, как правило, невозможно. Это особенно критично в оборонной промышленности, где недопустимы не только функциональные сбои, но и любые неконтролируемые электромагнитные излучения, способные стать каналом утечки защищаемых данных.

В высокоплотных компактных электронных системах, уровень ЭМП должен быть минимизирован. Традиционно подавление излучения обеспечивается за счёт рядов переходных отверстий, формирующих шов по всему периметру печатной платы. Такое решение отличается простотой реализации и низкой стоимостью. Однако оно приводит к увеличению габаритов платы, что противоречит современной тенденции к миниатюризации. Кроме того, эффективность экранирования шва из переходных отверстий ограничена технологическими возможностями производства – минимально достижимым шагом между отверстиями. В ряде случаев требуемая степень экранирования не может быть достигнута даже при использовании предельно малого шага.

Альтернативным способом минимизации излучения с краёв печатной платы является применение технологии металлизации торцов. Данный метод предполагает нанесение проводящего покрытия на боковые грани платы и обеспечивает более эффективное подавление излучения по сравнению со швами из переходных отверстий. Кроме того, металлизированные кромки не требуют выделения дополнительной площади, необходимой для размещения переходных отверстий. Однако технология металлизации торцов характеризуется более высокой стоимостью.

В статье исследуется эффективность металлизации торцов печатной платы и переходных отверстий в качестве защиты от электромагнитных помех при различных конфигурациях. Эффективность экранирования рассчитывается путём сравнения уровня излучения при наличии и отсутствии экрана.

В варианте с «прошивкой» из переходных отверстий исследуется зависимость эффективности экранирования от шага между отверстиями. В варианте с металлизацией торцов варьируется длина каждого металлизированного участка кромки при фиксированной ширине разрыва для оценки влияния на эффективность экранирования. Кроме того, эффективность экранирования в обоих вариантах сравнивается на нескольких критических частотах.

Общее описание исследуемой модели.

Исследуемая плата имеет размеры 90 мм × 20 мм и содержит шесть проводящих слоёв. Верхний слой, нижний слой, слой 3 и слой 4 представляют собой плоскости заземления (GND) толщиной 22 мкм, тогда как слой 2 и слой 5 являются высокоскоростными сигнальными слоями толщиной 18 мкм. Диэлектрический материал характеризуется диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) 3,7 и тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\tan\delta$ ) 0,035. Толщины диэлектрических слоёв с 1 по 5 составляют соответственно: 52 мкм, 51 мкм, 60 мкм, 51 мкм и 52 мкм. Стек платы приведен на рисунке 1.

Печатная плата имеет два порта: порт 1 подключён к слою 2, а порт 2 – к слою 5, как показано на рисунке 2. Сигнальные проводники, обозначенные сплошной фиолетовой линией расположены в слое 2, пунктирной – в слое 5. Линии передачи соединены между собой скрытыми переходными отверстиями.

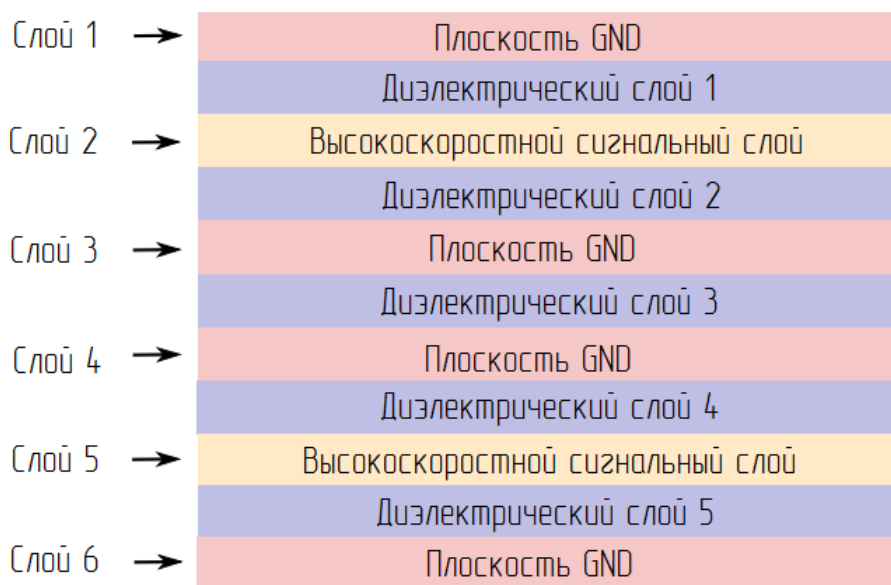


Рисунок 1 – Стек исследуемой платы

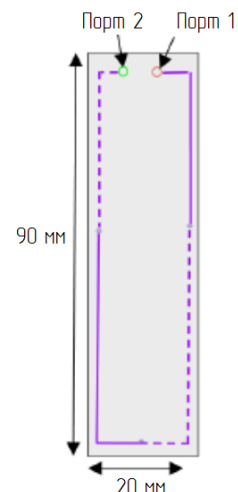


Рисунок 2 –  
Схема  
расположения  
сигнальных  
проводников на  
плате

В рамках проведения моделирования детально исследуются следующие частоты:

700 МГц – нижний диапазон LTE;

850 МГц – нижний диапазон GSM;

2440 МГц – WLAN 802.11b/g/n;

Проведение моделирования.

В качестве сравнения методов экранирования рассмотрим 3 случая:

1. Контрольный образец МПП без использования экранирования. Для случая с использованием только печатной платы (рисунок 2(а)) не применяется ни металлизация кромок, ни добавление соединительных переходных отверстий. Данный случай используется в качестве для сравнения.

2. МПП с металлизацией кромок. На рисунке 2(б) металлизация кромок обозначена красными линиями. Для обеспечения торцевой металлизации в составе групповой заготовки необходимо учитывать наличие технологических перемычек, ведущих к отсутствию металлизации торца в местах их размещения. Вследствие чего, в таком покрытии необходим технологический разрыв. Размер разрыва обозначен как  $t$ , и он зафиксирован на уровне 2 мм. Длина металлизированного участка  $s$  варьируется в соответствии со значениями таблицы 1.

3. МПП с «прошивкой» металлизированными отверстиями. Соединительные переходные отверстия располагаются по периметру печатной платы с определённым шагом. Эти отверстия, как правило, соединяются с внутренними слоями, выделенными под опорные плоскости заземления (GND). На рис. 2(с) соединительные переходные отверстия обозначены зелёными окружностями; диаметр сверления отверстия составляет 0,1 мм. Параметр  $a$  обозначает расстояние между краями соседних переходных отверстий и приведен в таблице 1.

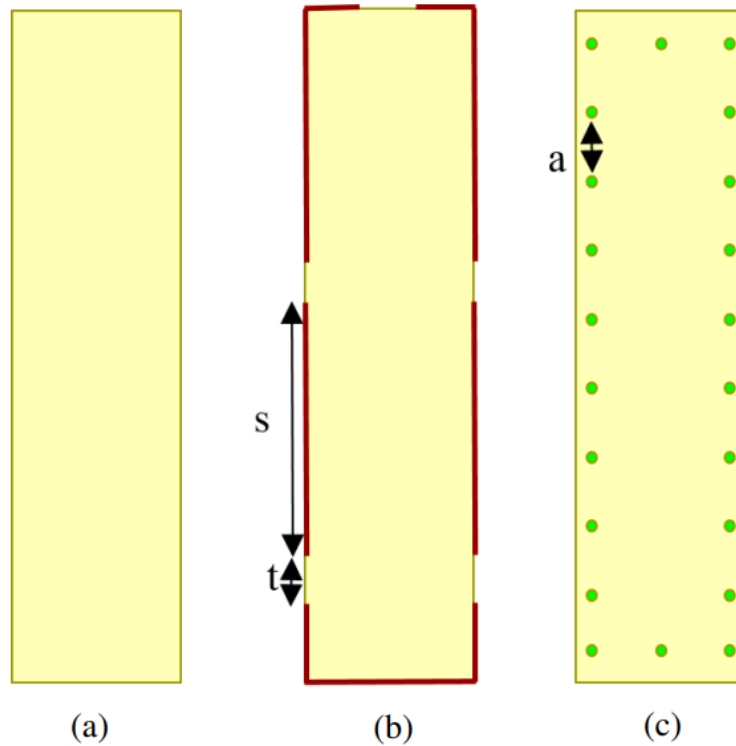


Рисунок 3 – Контрольный образец МПП без использования экранирования (а). МПП с металлизацией кромок (b) (красным обозначены участки металлизации торцов). МПП с «прошивкой» металлизированными отверстиями (с) (зеленым обозначены металлизированные отверстия)

Конфигурации исследуемых образцов МПП

Таблица 1

| Металлизация торцов (t=2 мм) | «Прошивка» металлизированными отверстиями |
|------------------------------|-------------------------------------------|
| s = 5 мм                     | a = 10 мм                                 |
| s = 15 мм                    | a = 5 мм                                  |
| s = 25 мм                    | a = 2 мм                                  |
| s = 40 мм                    | a = 0,1 мм                                |

Эффективность экранирования (SE) определяется следующим образом:

$$SE_E = \frac{E_{trans}}{E_{inc}}$$

$$SE_H = \frac{H_{trans}}{H_{inc}}$$

где  $SE_E$ ,  $SE_H$  – эффективность экранирования для электрического и магнитного полей соответственно;

$E_{trans}$ ,  $H_{trans}$  – максимальные значения прошедшего (проникшего сквозь экран) электрического и магнитного полей;

$E_{inc}$ ,  $H_{inc}$  – значения электрического и магнитного полей в той же позиции при отсутствии экранирования.

Моделирование производилось в программном пакете CST Studio. Результаты моделирования представлены на рисунках 4–6

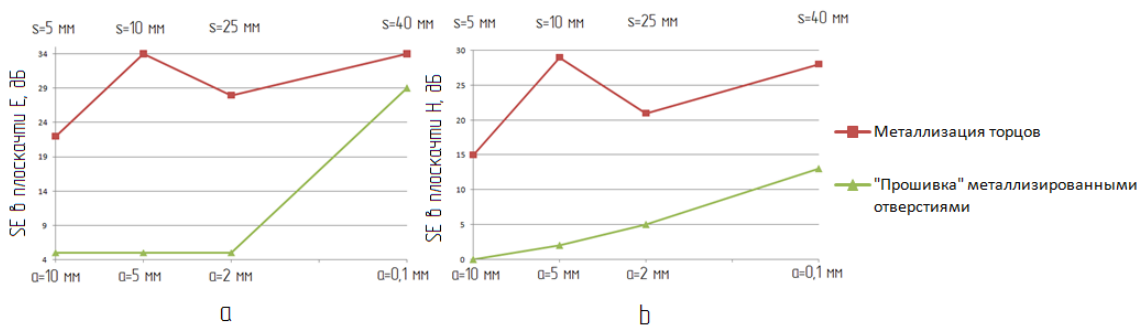


Рисунок 4 – Результат моделирования при частоте 700 МГц

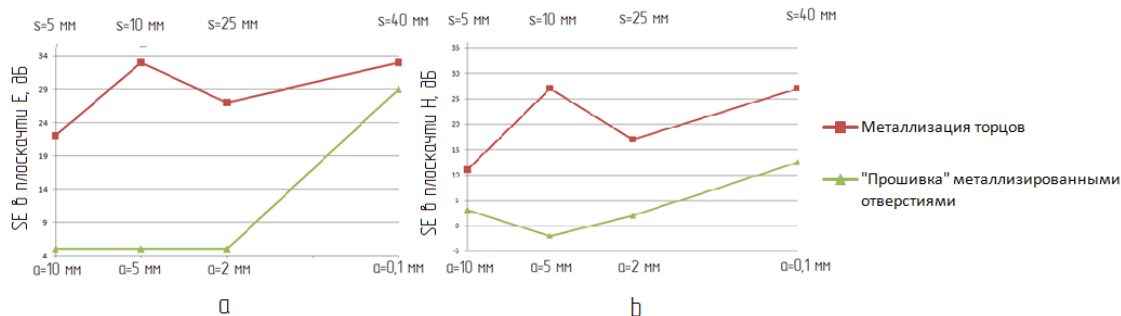


Рисунок 5 – Результат моделирования при частоте 850 МГц

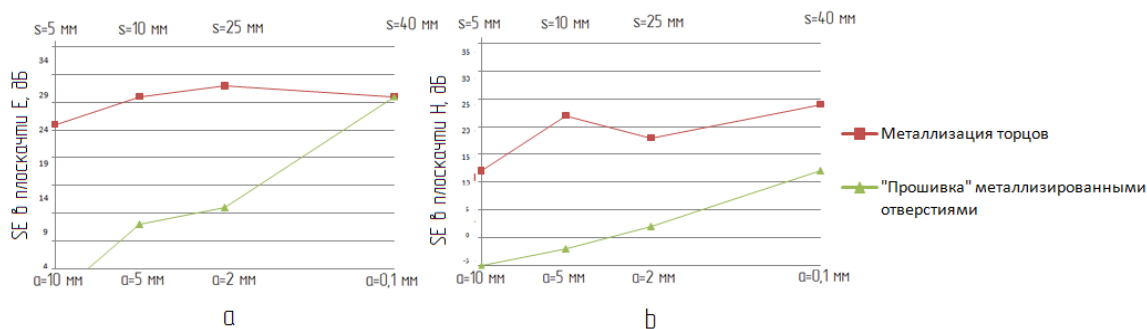


Рисунок 6 – Результат моделирования при частоте 2440 МГц

На рисунке 6 в случаях с применением «прошивки» переходными отверстиями для случая с шагом  $a = 10$  мм наблюдается усиление как электрического, так и магнитного полей по сравнению с вариантом «Контрольный образец МПП без использования экранирования». Это означает, что соединительные переходные отверстия при такой конфигурации будут создавать дополнительные помехи.

Эффективность экранирования для варианта с металлизацией кромок при  $s = 25$  мм оказывается не лучше, чем при  $s = 15$  мм. Это объясняется тем, что при  $s = 25$  мм металлизированная кромка не экранирует переходной участок от слоя 2 к слою 5. Данный переходной участок представляет собой область неоднородности, в которой происходит накопление поля, тогда как в случае  $s = 15$  мм такая ситуация не возникает.

Следует отметить, что применение того или иного метода экранирования зависит от конкретной задачи и в большинстве случаев является компромиссным решением. В некоторых приложениях приоритетом является снижение стоимости, в других случаях ключевым фактором становится уменьшение габаритных размеров или повышение эффективности экранирования. В особых случаях может быть применена комбинация этих методов, что даст более высокую эффективность экранирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao Y. S. и др. PCB Edge Shielding Effectiveness Evaluation and Design Guidelines // 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI). : IEEE, 2018. С. 269-274.
2. Ye X., Hockanson D., Li M., Ren Y., Cui W., Drewniak J., Dubroff R. EMI mitigation with multilayer power-bus stacks and via stitching of reference planes // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2001. – Vol. 43, № 4. – P. 538-548.
3. Chiappe J. A comparison of relative shielding provided by stitching vias and edge plating // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2015. – P. 101-106.
4. Liu Q., Jiao X., Li J., Khilkevich V., Dixon P., Arien Y., Drewniak J. Modeling absorbing material for EMI mitigation // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Aug. 2015.
5. Cao Y. S., Wang Y., Jiang L. J., Ruehli A. E., Drewniak J., Fan J. Quantifying EMI: a methodology for determining and quantifying radiation for practical design guidelines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 59, № 5. – P. 1424-1432.
6. Боков, А. А. Влияние конструкции стека печатной платы на целостность сигнала / А. А. Боков, Е. А. Данилова // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2025. – Т. 2. – С. 428-431.
7. Алмашкина, Н. С. К проблеме обеспечения качества металлизации отверстий / Н. С. Алмашкина, Е. А. Данилова // Полупроводниковые материалы в современной микро- и нанoeлектронике : Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти д.ф.-м.н., профессора В.А. Вилалова, Махачкала, 23-24 ноября 2020 года. – Махачкала: Типография ФОРМАТ, 2020. – С. 47-51. – EDN AMTZJN.

## ГЛАВА 7. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ, ИЗМЕРЕНИЙ И СЕРТИФИКАЦИИ

УДК 620.178.5:004.932.2

Юдин<sup>1</sup> М. А.

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> kipra@pnzgu.ru

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрены существующие методы измерения параметров вибрационного перемещения с акцентом на задачи регистрации пространственных колебательных процессов в технических системах. Проанализирован физический смысл вибрационного перемещения и показана его инженерная значимость при диагностике и оценке динамического состояния объектов. Рассмотрены контактные и бесконтактные методы измерения, а также косвенные подходы, основанные на восстановлении перемещения по данным виброускорения. Отдельное внимание уделено ограничениям, связанным с численным интегрированием, влиянием измерительных средств на объект и сложностью регистрации пространственных форм вибраций. Проанализированы возможности и ограничения векторных и комбинированных измерительных систем. Показано, что существующие методы характеризуются фундаментальными ограничениями по точности, частотному диапазону и устойчивости к внешним воздействиям, что определяет необходимость поиска альтернативных подходов к измерению параметров пространственного вибрационного движения.

**Ключевые слова:** вибрационное перемещение, вектор вибрации, методы измерения вибраций, виброизмерительные системы, акселерометры, лазерная доплеровская виброметрия, бесконтактные методы измерения, обработка вибрационных сигналов, частотный анализ вибраций, метрологическое обеспечение измерений

Yudin<sup>1</sup> M. A.

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> kipra@pnzgu.ru

### ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR MEASURING VIBRATIONAL DISPLACEMENT VECTOR PARAMETERS

**Abstract.** This research paper examines existing methods for measuring vibration displacement parameters, focusing on the recording of spatial oscillatory processes in technical systems. The physical meaning of vibration displacement is analyzed, and its engineering significance in diagnosing and assessing the dynamic state of objects is demonstrated. Contact and non-contact measurement methods, as well as indirect approaches based on displacement reconstruction based on vibration acceleration data, are considered. Special attention is given to limitations associated with numerical integration, the influence of measuring instruments on the object, and the complexity of recording spatial vibration patterns. The capabilities and limitations of vector and combined measurement systems are analyzed. It is shown that existing methods are characterized by fundamental limitations in accuracy, frequency range, and resistance to external influences, necessitating the search for alternative approaches to measuring spatial vibrational motion parameters.

**Keywords:** vibrational displacement, vibration vector, vibration measurement methods, vibration measuring systems, accelerometers, laser Doppler vibrometry, non-contact measurement methods, vibration signal processing, vibration frequency analysis, metrological support for measurements

#### Введение

Техногенные системы, применяемые в настоящее время, подвергаются вибрационным воздействиям. Эти воздействия могут генерироваться самими системами, а могут поступать извне. Из этого следует, что при расчете надежности систем и прогнозировании их состояния необходимо учитывать параметры вибрационных процессов, воздействующих на оборудование в течение длительного времени. Механические вибрации воздействуют на механизмы и машины, здания и сооружения, ГЭС, ТЭЦ, АЭС, мосты, летательные и космические аппараты, радиоэлектронную аппаратуру. В статье [1] показано, что вибрационные перемещения элементов поверхности конструкций современных технических средств, осуществляются по сложным траекториям, что усложняет их анализ и требует внедрения принципиально новых методов и средств, обнаружения и анализа вибрационных процессов.

Если, например, ротор электродвигателя сбалансирован идеально, то вибрации, передаваемые на его невращающиеся части, стремятся к нулю. Но реальные электродвигатели так же, как и любые другие техногенные (и не только техногенные) объекты, не являются идеальными. Поэтому при работе технических объектов и систем возникают вибрации, которые передаются невращающимся частям устройств. Далее, при работе системы дисбалансы и трещины усиливаются. Это отражается на интенсивности и характере вибрационных процессов. Задача аналитической системы заключается в том, чтобы определять общую интенсивность вибрационного процесса сложной конфигурации, а также в том, чтобы оценивать параметры пространственной направленности различных составляющих этого процесса. Кроме того важно, чтобы измерения осуществлялись дистанционно. В статье [2] на примере решения проблемы тепловых технико-диагностических измерений показана актуальность и основные метрологические подходы бесконтактных измерительных методов.

В статье [3] показано, что наиболее информативным методом неразрушающего контроля технических средств непосредственно в процессе их эксплуатации является метод вибрационный.

В соответствии с ГОСТ 32106-2013 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов» оценка состояния оборудования осуществляется по двум критериям:

- 1) по абсолютным значениям контролируемого параметра вибрации;
- 2) по скорости изменения контролируемого параметра вибрации.

В статьях [4] и [5] рассматриваются методы и подходы вибрационной диагностики с позиций реализации этих критериев.

Обнаружение дефектов в латентной фазе, прогнозирование остаточного ресурса оборудования, идентификация одного из трех состояний, предусмотренных ГОСТ 32106-2013 осуществляется по результатам измерения и оценки вибраций.

Эти состояния:

- 1) допустимо;
- 2) требует принятия мер;
- 3) недопустимо.

При этом вибрации современных технических систем по мере их совершенствования и усложнения также усложняются. Более подробно эти тенденции охарактеризованы в публикациях [6], [7], [8]. В результате возрастают требования к аналитическим и диагностическим средствам измерений. Анализ этих требований проведен в статьях [9], [10], [11].

Известны параметры вибраций: вибрационное ускорение, вибрационная скорость и вибрационное перемещение. Последний из названных параметров имеет значение особое, потому что позволяет предметно оценить именно деформации элементов, геометрические смещения узлов конструкции, связать изменение указанного параметра вибрации с развитием дефектных признаков, таких как трещины, пустоты, микрошероховатости, раковины.

Методы и средства вибрационной диагностики, в основе которых лежит мониторинг именно вибрационного перемещения обладают наибольшей чувствительностью и, как следствие, наибольшей достоверностью идентификации вибрационного состояния контролируемого оборудования. Рост интенсивности вибрационного перемещения часто прослеживается уже на ранних стадиях развития дефектов. Таким образом, приращение вибрационного перемещения, общее либо локальное (в одном или нескольких направлениях) является важным индикатором деградиационных процессов, происходящих в оборудовании. Эти особенности контролируемых параметров вибраций описаны в литературных источниках [12], [13].

В статьях [14] и [15] проведено исследование возможности дистанционной векторной идентификации состояний объекта контроля непосредственно в процессе его функционирования, без остановки и разборки. Исследование показало, что возможность такая есть.

Вибрационное перемещение в общем случае рассматривается как векторная величина, определяемая совокупностью его проекций на выбранную систему координат. Пространственные характеристики вибрационного перемещения позволяют более полно описать динамическое поведение объекта, выявить несимметрию жёсткости, особенности форм колебаний и наличие локальных нарушений в конструкции. Анализ векторных параметров вибрационного перемещения расширяет диагностические возможности по сравнению с одномерными измерениями и позволяет глубже понять физическую природу происходящих процессов.

Измерение параметров вектора вибрационного перемещения связано с рядом методических и технических сложностей. Существующие измерительные методы отличаются по физическим принципам, диапазонам рабочих частот, точности, чувствительности к внешним воздействиям и сложности практической реализации. Каждый из применяемых подходов обладает определёнными преимуществами, но одновременно характеризуется ограничениями, которые становятся особенно заметными при анализе пространственно сложных вибрационных процессов.

Настоящая научно-исследовательская работа посвящена анализу существующих методов измерения параметров вектора вибрационного перемещения. Основное внимание уделяется рассмотрению физических принципов измерения, инженерной реализуемости применяемых методов, их точностных характеристик и частотных ограничений. Рассматриваемые подходы анализируются с точки зрения их применимости к задачам регистрации пространственных вибрационных процессов в реальных условиях эксплуатации. Изложенный материал формирует основу для выявления принципиальных ограничений традиционных методов измерения и определения направлений дальнейшего развития измерительных систем.

## 1 Физический смысл и инженерная роль вибрационного перемещения

Вибрационное перемещение представляет собой одну из базовых кинематических характеристик колебательного движения и описывает мгновенное положение материальной точки или элемента конструкции относительно положения равновесия. В классической механике именно перемещение является первичной величиной, из которой путём дифференцирования по времени получают виброскорость и виброускорение. По этой причине вибрационное перемещение содержит наиболее полную информацию о характере движения системы и может рассматриваться как фундаментальный параметр для анализа вибрационных процессов.

С физической точки зрения вибрационное перемещение непосредственно связано с упругими свойствами конструкции и действующими на неё силами. Амплитуда перемещения определяется жёсткостью системы, массой элементов и характером внешних воздействий. При изменении этих параметров, вызванном износом, повреждениями или изменением условий эксплуатации, в первую очередь изменяется именно перемещение, тогда как изменения виброскорости и виброускорения могут проявляться менее явно или с временной задержкой.

Особое значение вибрационное перемещение приобретает при анализе низкочастотных колебаний. В этом диапазоне виброускорение имеет малые значения и часто оказывается сопоставимым с уровнем шумов измерительных каналов. Вибрационное перемещение, напротив, сохраняет достаточную амплитуду и информативность, что делает его предпочтительным параметром для диагностики медленно развивающихся процессов, таких как ползучесть, ослабление креплений, потеря жёсткости и изменение условий опирания конструкций.

По мере развития техники, которое сопровождается перманентным усложнением оборудования, повышается и сложность траектории вибрационного перемещения элементов невращающихся частей техногенных объектов контроля. Вибрационные треки перемещений все чаще и чаще становятся трехмерными. В результате возрастают требования к аналитическим приборам, посредством которых осуществляется вибрационный мониторинг состояния объекта контроля. Такие понятия, как, например, амплитуда вибрации, усложняются, приобретая новый смысл. Пространственная картина вибрационного перемещения должна быть описана в проблемно ориентированной сжатой форме, а кейс интегральных и структурных определений должен соответствовать возрастающей сложности процессов.

Анализ сложной траектории вибрационного перемещения позволяет судить как об общей интенсивности вибрационного процесса, так и об основной направленности его. В результате пользователь получает информацию о состоянии объекта контроля и осуществляется пространственная локализация источника зреющей в глубине его неисправности. При этом оценка интенсивности вибрационного процесса осуществляется точнее, чем с применением известных средств вибрационного анализа и контроля.

Комплексный анализ интенсивности и направленности вибрационного процесса позволяет осуществлять локализацию развивающегося дефекта, который на момент обнаружения находится в латентной фазе. При этом не всегда решение является центрально симметричным. Перемещение вдоль одной оси может показывать, что объект контроля требует принятия мер, в то время как большее перемещение по другой оси не является причиной для беспокойства. Таким образом, необходим соответствующий взвешенный подход к интегральным и структурным определениям, позволяющий формировать адекватные характеристические признаки на основе анализа сложной траектории вибрационного перемещения элемента поверхности объекта контроля.

Как уже было сказано, вибрационное перемещение элемента поверхности объекта контроля обладает наиболее высокой информативностью в плане решения задач вибрационной диагностики. При этом измерение этого параметра вибрационных процессов сопряжено с рядом проблем и сложностей. Дело в том, что чем выше частота анализируемого вибрационного процесса, тем меньше амплитуда вибрационного перемещения. Это связано с наличием инерционных масс, явно или неявно присутствующих в анализируемом процессе. В последующих разделах данной научно-исследовательской работы предпринимается попытка анализа существующих методов измерения и анализа вибрационных процессов на предмет выявления преимуществ и ограничений этих методов с точки зрения решения задач вибрационной диагностики.

## 2 Сравнительный анализ контактных и бесконтактных подходов

Измерение вибрационного перемещения может осуществляться как контактными, так и бесконтактными методами и средствами. Контактные методы измерения вибраций реализуются просто, путем закрепления контактного датчика на поверхности объекта контроля, например, путем примагничивания. Контактные датчики измеряют последовательность мгновенных значений измеряемого параметра, в качестве которого обычно выступает вибрационное ускорение. Вибрационное перемещение



посредством таких преобразователей может быть измерено только косвенно, путем математических вычислений. Если при этом годограф вибрационного перемещения представляет собой сложную конфигурацию, то вычислительные процедуры усложняются и, как правило, происходит внесение неприемлемо высокой измерительной погрешности.

Оптические методы занимают особое место среди бесконтактных способов измерения вибрационного перемещения. Лазерная доплеровская виброметрия позволяет регистрировать виброскорость удаленно, без физического контакта с объектом. Вибрационное перемещение при этом восстанавливается путём численного интегрирования измеренного сигнала. Такой подход обеспечивает высокую пространственную разрешающую способность и гибкость в организации измерений, однако сопровождается трудностями, связанными с накоплением ошибок интегрирования и дрейфом в низкочастотной области.

**3 Косвенные методы определения вибрационного перемещения и проблемы интегрирования**

Косвенное измерение вибрационного перемещения на основе исходного вибрационного ускорения осуществляется путем последовательного численного интегрирования полученной на выходе первичного преобразователя последовательности мгновенных значений измеряемого параметра, которым при применении контактных методов измерения вибрации, как правило, является вибрационное ускорение. Численное интегрирование осуществляется по времени. Акселерометры доступны, устойчивы к внешним воздействиям, обладают относительно широким частотным диапазоном.

Метод вычисления вибрационного перемещения элемента поверхности объекта контроля на основе результатов непосредственного измерения мгновенного значения вибрационного ускорения имеет ряд преимуществ. Установка контактных первичных преобразователей на поверхность техногенного объекта осуществляется легко, эти преобразователи имеют компактные размеры. Преимуществом контактных акселерометров является также возможность проводить измерения в жестких условиях эксплуатации. Современные технические средства имеют высокую частоту дискретизации. Они обеспечивают возможность одновременной регистрации контролируемого параметра вибрации по нескольким каналам. Все это создает предпосылки для анализа трехмерных вибраций.

С другой стороны, например, при регистрации низкочастотных вибраций, частота которых не превышает 500Гц, размах вибрационного ускорения снижается. Зато возрастает влияние нестационарных внешних помех. В результате возрастает нестабильность оценивания вибрационного перемещения, а с ней и потребность во внедрении более сложных алгоритмов фильтрации и коррекции. Высокочастотные градиентные фильтры снижают внешний помеховый дрейф, но и информативные медленные колебания ими также подавляются.

При воздействии нестационарных вибрационных процессов на исследуемый элемент поверхности объекта контроля эффективность косвенных методов измерения вибрационного процесса снижается. При этом возрастает зависимость измеренных значений вибрационного перемещения от параметров обработки, что, в свою очередь, повышает методическую погрешность измерений.

Численное интегрирование по времени последовательности измеренных мгновенных значений вибрационного ускорения увеличивает необходимый объем вычислений, усложнению алгоритмов анализа. Измерения в реальном масштабе времени при этом не всегда возможны.

Несмотря на перечисленные недостатки, методы косвенного определения вибрационного перемещения продолжают широко применяться в инженерной практике. Это объясняется универсальностью акселерометров и развитой инфраструктурой измерительного оборудования. Однако при решении задач, связанных с регистрацией пространственно сложных и низкочастотных вибрационных процессов, ограничения интеграционных подходов становятся определяющими и требуют критического анализа.

Рассмотренные особенности косвенных методов измерения показывают, что восстановление вибрационного перемещения на основе ускорения связано с фундаментальными ограничениями, обусловленными как физическими свойствами измеряемых процессов, так и особенностями математической обработки сигналов. Эти ограничения приобретают особую значимость при измерении параметров вектора вибрационного перемещения и подводят к необходимости анализа специализированных векторных измерительных систем и комбинированных подходов, что рассматривается в следующем разделе данной научно-исследовательской работы.

**Заключение**

В статье проведен анализ существующих методов измерения вибраций. Обоснована особая роль вибрационного перемещения элемента поверхности объекта контроля для диагностирования дефектов, находящихся в латентной фазе своего развития.

Преимущественная область применения данного параметра вибрационных процессов – низкочастотная область колебаний и сложные вибрационные траектории элемента поверхности объекта контроля. При этом показаны проблемы, возникающие при попытках осуществлять интегральные и структурные определения сложных пространственных траекторий вибрационных перемещений, базируясь на известных и распространенных методах и средствах измерения параметров вибраций.

Контактные методы измерения обеспечивают прямую регистрацию перемещения, однако оказывают влияние на динамику объекта и ограничены по частотному диапазону. Бесконтактные методы позволяют сохранить исходные характеристики системы, но чувствительны к внешним условиям и часто требуют сложной аппаратной реализации. Косвенные методы, основанные на измерении виброускорения, отличаются универсальностью, однако сопровождаются накоплением ошибок при интегрировании и снижением точности в низкочастотной области.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.И., Данилова Е.А., Кочегаров И.И. Компоновка безрезонансных блоков бортовых радиоэлектронных систем с использованием двухслойных печатных плат с жесткой основой // Надежность и качество сложных систем. 2024. №3. С. 73–81.
2. Бейсембаева Б.С., Горячев Н.В., Лысенко А.В., Трусов В.А., Юрков Н.К. Средства реализации бесконтактного способа измерения температуры при неразрушающем контроле тепловых режимов радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2025. №2. С. 47–54.
3. Юрков Н.К., Григорьев А.В., Данилова Е.А., Кочегаров И.И., Горячев Н.В. Оценка погрешности цифрового моделирования вибрационных воздействий на бортовую радиоэлектронную аппаратуру // Измерительная техника. 2024. №6. С. 18–25.
4. Григорьев А.В., Кочегаров И.И., Юрков Н.К. Исследование возможности применения вибрационного размытия изображения круглой метки для контроля технического состояния движущихся механизмов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. №1. С. 107–119.
5. Григорьев А.В., Кочегаров И.И., Юрков Н.К. Принципы контроля технического состояния движущихся механизмов на основе анализа динамики вибрационного размытия изображения круглой метки // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. №2. С. 119–131.
6. Григорьев А.В., Кочегаров И.И., Юрков Н.К., Реута Н.С., Лапшин Э.В. Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы // Надежность и качество сложных систем. 2020. №3. С. 55–63.
7. Григорьев А.В., Кочегаров И.И., Юрков Н.К., Реута Н.С., Бростилов С.А. Дизъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. №3. С. 106–113.
8. Григорьев А.В., Кочегаров И.И., Юрков Н.К., Реута Н.С., Горячев Н.В. Конъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. №3. С. 57–67.
9. Григорьев А.В. Оценка интенсивности вибрации на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. №3. С. 5–14.
10. Григорьев А.В. Оценка методической погрешности измерения общего уровня вибрации на основе анализа размытия изображения круглой метки // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. №4. С. 24–30.
11. Ескибаев Е.Т., Ануар Г.А., Избасов А.Г., Рыбаков И.М., Байсеитов М., Григорьев А.В. Повышение точности прогнозирования надежности конструкций электронной аппаратуры за счет усовершенствования моделей и методов расчета // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. №2. С. 57–67.
12. Реута Н.С., Юрков Н.К., Григорьев А.В., Кочегаров И.И., Данилова Е.А. Особенности калибровки информационно-измерительных систем диагностики технического состояния на основе анализа размытия изображения круглой метки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. №1. С. 101–114.
13. Григорьев А.В. Влияние величины радиуса круглого фрагмента на погрешность измерения интенсивности вибрации по приращению площади изображения этого фрагмента // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2024. №1. С. 116–121.
14. Григорьев А.В. Метод вибрационной диагностики предаварийных состояний техногенных и природных объектов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. №1. С. 114–122.
15. Григорьев А.В. Исследование возможности идентификации предаварийного состояния объекта по вибрационному размытию изображения тестового фрагмента круглой формы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. №1. С. 149–158.

УДК 004

**Максимов<sup>1</sup> А.А., Кочегаров<sup>2</sup> И.И., Трусов<sup>3</sup> А.В.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ AR-ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ QR-КОДА**

**Аннотация.** Рассматриваются принципы построения систем тестирования электронного оборудования с применением технологий дополненной реальности (AR) и QR-кодов. Освещается исторический контекст развития AR для интеграции виртуальных объектов в реальное окружение. Описан принцип работы AR-систем: от захвата изображения камерой устройства и распознавания QR-кода до визуализации обработанной информации в контексте реального окружения. Особое внимание уделено практическому применению AR с QR-кодами в тестировании и обслуживании электронного оборудования: первичной проверке, калибровке приборов, а также описаны преимущества технологии. Рассмотрены перспективы развития AR-технологий, показано, что внедрение AR с QR-кодами способствует оптимизации производственных и сервисных процессов, сокращению временных и финансовых затрат, а также минимизации рисков, связанных с человеческим фактором.

**Ключевые слова:** электроника, автоматизация, промышленный инжиниринг, технологии дополненной реальности в технических системах

**Maksimov<sup>1</sup> A.A., Kochegarov<sup>2</sup> I.I., Trusov<sup>3</sup> A.V.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

**Abstract.** The article examines the principles of building electronic equipment testing systems using augmented reality (AR) technologies and QR codes. It highlights the historical context of AR development for integrating virtual objects into realworld environments. The operating principle of AR systems is described – from image capture by a device’s camera and QR code recognition to the visualization of processed information in the context of the real environment. Particular attention is given to the practical application of AR with QR codes in the testing and maintenance of electronic equipment, including initial checks and instrument calibration. The advantages of the technology are also outlined. The prospects for the development of AR technologies are discussed, demonstrating that the implementation of AR with QR codes helps optimize production and service processes, reduce time and financial costs, and minimize risks associated with the human factor.

**Keywords:** electronics, automation, industrial engineering, application of augmented reality technologies in technical systems

Дополненная реальность (Augmented Reality, AR) представляет собой технологическую среду, которая в режиме реального времени дополняет восприятие физического мира цифровыми данными посредством специализированных устройств – смартфонов, планшетов, ARочков – и соответствующего программного обеспечения. Ключевая особенность технологии заключается в наложении виртуальной графической информации на реальное окружение: пользователь видит интегрированное изображение на экране устройства, где реальные объекты сочетаются с цифровыми элементами. Основная задача дополненной реальности состоит в предоставлении контекстной информации, уточняющей характеристики реальных объектов и облегчающей взаимодействие с ними.

Развитие технологий дополненной реальности берёт начало в середине 1990х годов. В 1995 году Джун Рекимото создал Navisam – прототип мобильного устройства дополненной реальности, предвосхитивший современные решения. Устройство состояло из переносного дисплея с закреплённой на обратной стороне камерой; видеопоток с неё обрабатывался компьютером, и при обнаружении специальной цветной метки на экране отображалась информация об объекте.

Уже в 1996 году Джун Рекимото совместно с Юджи Аятцука разработали Матричный Метод (КиберКод), который описывал реальные и виртуальные объекты с помощью плоских меток, аналогичных QR-кодам. Это решение позволило эффективно интегрировать виртуальные элементы в реальный мир путём размещения соответствующих маркеров, что существенно расширило возможности практического применения AR.

Функционирование систем дополненной реальности с применением QR-кодов базируется на технологиях распознавания образов и отслеживания маркеров. QR-коды выступают в роли удобных и надёжных маркеров: благодаря монохромной структуре они легко распознаются алгоритмами машинного зрения, что обеспечивает стабильную работу системы.

Процесс взаимодействия пользователя с ARсистемой начинается с инициирования запроса через устройство взаимодействия. Камера устройства фиксирует реальное изображение, которое затем передаётся в систему рендеринга (визуализации). Программное обеспечение анализирует полученное изображение, выявляя QR-код и определяя его уникальные характеристики. После распознавания маркера приложение обращается к серверу для получения соответствующих данных – это может быть техническая документация, параметры работы оборудования, история техобслуживания и т.д.

Далее система выполняет верификацию полученных данных, проверяя их подлинность и соответствие текущему контексту. На завершающем этапе обработанная информация накладывается на реальное изображение и отображается на экране устройства в виде дополнительных графических элементов: текстовых подсказок, графиков, 3Dмоделей или анимаций. Таким образом формируется интегрированная визуальная среда, где физические объекты дополняются релевантными цифровыми данными.

На рис. 1 схематически представлена последовательность работы системы дополненной реальности.

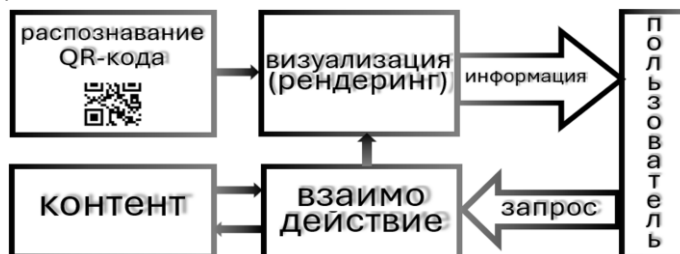


Рисунок 1 – Схема последовательности работы дополненной реальности

Полный цикл обработки включает несколько последовательных этапов:

- сбор изображения с камеры пользователя;
- анализ полученного кадра и выявление QRкода;
- поиск в базе данных сервера соответствующей информации;
- проверка достоверности и актуальности данных;
- визуализация обработанной информации в контексте реального окружения.

После получения первичной информации пользователь может запросить дополнительные сведения об объекте или продолжить сканирование других элементов оборудования.

В зависимости от способа обработки и отслеживания информации выделяют несколько типов систем дополненной реальности:

- системы с отслеживанием положения;
- системы машинного зрения;
- комбинированные решения.

Системы машинного зрения особенно актуальны для задач тестирования электронного оборудования. Они собирают данные с помощью инструментов обработки изображений и маркеров (в т.ч. QRкодов), обеспечивая высокую точность позиционирования виртуальных объектов относительно реальных.

Архитектура типовой ARсистемы для тестирования электронного оборудования включает следующие компоненты:

- аппаратная часть – смартфон/планшет с камерой и дисплеем, тестовое оборудование с цифровым интерфейсом, IoTдатчики для сбора параметров в реальном времени;

- программная часть: ARфреймворк (Unity + AR Foundation, ARKit, ARCore, Vuforia), модуль распознавания QRкодов, интерфейс визуализации, сервер сбора и обработки данных;

- интеграционные компоненты – протоколы связи (WiFi, Bluetooth, USB), API измерительных приборов, конвертеры аналоговых сигналов.

Интеграция дополненной реальности и QRкодов открывает широкие возможности для оптимизации процессов тестирования и обслуживания электронного оборудования. При наведении камеры устройства на QRкод, размещённый на корпусе прибора или рядом с ним, оператор получает мгновенный доступ к релевантной информации:

- параметрам работы устройства (напряжение, ток, температура, частота);
- инструкциям по подключению тестового оборудования;
- индикации проблемных зон (перегрев, короткое замыкание);
- истории техобслуживания и ремонтов;
- рекомендациям по устранению неисправностей.

Такой подход позволяет:

- сократить время диагностики за счёт мгновенного доступа к данным;
- снизить вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором;
- стандартизировать процедуры тестирования;
- обеспечить удалённую поддержку: эксперт видит ту же картину, что и оператор, и может давать подсказки в режиме реального времени;
- автоматизировать формирование отчётов: результаты измерений, фото/видео дефектов, время теста сохраняются и передаются в ERP/CMDB.

Конкретные сценарии использования включают:

первичную проверку печатных плат (AR выделяет зоны для замера напряжения, показывает допустимые диапазоны);  
диагностику сбоев (система подсвечивает потенциально неисправный модуль, предлагает последовательность измерений);  
калибровку приборов (AR подсказки направляют оператора по этапам процедуры, фиксируют результаты);  
обучение персонала (виртуальный ассистент контролирует правильность действий и даёт обратную связь).

Внедрение AR технологий с использованием QR кодов в системах тестирования электронного оборудования обеспечивает следующие преимущества:

повышение точности и скорости диагностики;  
снижение затрат на обслуживание за счёт автоматизации рутинных операций;  
накопление базы знаний (история тестов, типичные дефекты, решения);  
возможность удалённой экспертизы без выезда специалиста;  
улучшение качества обучения и адаптации персонала.

Перспективные направления развития связаны с интеграцией AR с другими технологиями:

искусственным интеллектом (прогноз отказов на основе анализа данных);  
цифровыми двойниками (виртуальное моделирование тестов до физического запуска);  
IoT и промышленным интернетом вещей (автоматический сбор параметров с датчиков);  
облачными платформами (централизованное хранение и обработка данных).

### **Заключение**

Системы тестирования электронного оборудования на базе дополненной реальности с использованием QR кодов представляют собой эффективный инструмент для оптимизации производственных и сервисных процессов. Сочетание наглядной визуализации, мгновенного доступа к информации и автоматизации рутинных операций позволяет существенно повысить качество контроля, сократить временные и финансовые затраты, а также минимизировать риски, связанные с человеческим фактором. Дальнейшее развитие технологии будет способствовать её более широкому внедрению в промышленности, энергетике, телекоммуникациях и других отраслях, где требуется высокая точность и надёжность тестирования сложного электронного оборудования.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А. А. Максимов, Л. Г. Когельман, И. Д. Круглов, А. С. Трубицкова Разработка устройства контроля с AR модулем для измерения параметров электронных приборов / Современные информационные технологии / Сборник научных статей – Пенза, ПензГТУ, 2025, Вып.42, с. 74–80.
2. Горбунов А.Л., Нечаев Е.Е., Теренци Г. Дополненная реальность в авиации // Прикладная информатика. – 2012. – № 4 (40).
3. Авдошин А.С., Забержинский Б.Э., Головин К.Ю. Анализ возможностей и перспектив использования дополненной реальности в теории и на практике // Актуальные проблемы науки, экономики и образования XXI века: матер. II Международной научно-практ. конф., 5 марта – 26 сент. 2012 г. – Самара: Самарский ин-т (фил.) РГТЭУ, 2012.
4. Azuma R. T. A Survey of Augmented Reality // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 1997. – Vol.6, №4. – p. 355–385. – DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355. Обзор принципов AR, включая классификацию систем, методы отслеживания и ключевые технологические вызовы.
5. Rekimoto J., Ayatsuka Y. CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags Based on 2D Codes // Proc. of Designing Augmented Reality Environments (DARE'99). – 1999. – p. 1–8. Описание Матричного Метода (КиберКода), заложившего основы использования плоских меток для привязки виртуальных объектов к реальному миру.
6. Billinghamurst M., Clark A., Lee G. A Survey of Augmented Reality // Foundations and Trends in Human-Computer Interaction. – 2015. – Vol.8, №2–3. – p. 73–272. – DOI: 10.1561/1800. Всесторонний анализ современных AR систем: методы отслеживания (маркеры, SLAM), аппаратные платформы, кейсы в промышленности, включая тестирование оборудования.
7. Denso Wave Inc. QR Code Specification. – 2000. – ISO/IEC 18004:2000. Официальный стандарт QR кодов, определяющий структуру, алгоритмы кодирования и требования к считыванию, критически важный для разработки AR решений с маркерной привязкой.
8. Kirman A. et al. HoloLens: The Next Generation of Human-Computer Interaction // IEEE Computer Graphics and Applications. – 2016. – Vol.36, №6. – p. 8–13. – DOI: 10.1109/MCG.2016.83. Архитектура AR платформы Microsoft HoloLens, релеванная для интеграции AR с IoT и SCADA системами в промышленных условиях.
9. Lee G. et al. Industrial Augmented Reality for Manual Assembly: A Field Study // Journal of Manufacturing Systems. – 2020. – Vol.55. – p. 286–298. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.03.005. Эмпирическое исследование эффективности AR подсказок (включая QR коды) в производственных процессах: снижение ошибок, ускорение сборки и обслуживания.
10. Bimber O., Raskar R. Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds. – AK Peters/CRC Press, 2005. – 480p. Монография, раскрывающая принципы пространственной AR, включая проекционные системы для тестирования оборудования и неразрушающего контроля.
11. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol.22, №11. – p. 1330–1334. – DOI: 10.1109/34.885118. Фундаментальная работа по калибровке камер, лежащая в основе точности наложения виртуальных объектов на реальные сцены в AR.
12. Codel T. P., Milgram P. Augmented Reality: An Application of HeadsUp Display Technology to Manual Manufacturing Processes // Proc. Hawaii Int. Conf. on System Sciences. – 1992. – Vol.2. –

р. 659–669. Ранняя работа, в которой Том Коделл формулирует концепцию AR применительно к промышленным задачам (в т.ч. сборке Boeing), обосновывая замену физических маркеров цифровыми.

13. Rekimoto J., Nagao K. The World Through the Computer: Computer Augmented Interactive Space // Proc. of the 1995 ACM International Conference on Multimedia. – 1995. – p. 29–36. – DOI: 10.1145/217690.217701. Оригинальная работа Джуна Рекимото, описывающая прототип Navicat и концепцию интеграции цифровых данных в физическое пространство.

14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18004–2015. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных. Спецификация символики штрихового кода QR Code. – М.: Стандартинформ, 2016. Российский аналог международного стандарта QRкодов, регламентирующий требования к генерации и считыванию меток.

15. Иванов А. В., Петров С. Л. Применение дополненной реальности в промышленном тестировании: от теории к практике // Приборостроение и автоматизация. – 2022. – №3. – с. 45–52. Анализ кейсов внедрения AR с QRкодами на российских предприятиях, включая оптимизацию диагностики и обслуживания электронного оборудования.

16. Сидоров Д. К., Козлов М. Н. Интеграция AR и IoT для мониторинга промышленного оборудования // Автоматизация технологических процессов. – 2023. – № 1. – с. 78–85. Исследование взаимодействия ARсистем с датчиками IoT, сценарии сбора и визуализации параметров в реальном времени.

17. Интерфейс будущего – системы дополненной реальности [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/124561/> (дата обращения: 11.03.26).

УДК 621.311

**Егоров<sup>1</sup> Н.А., Гусев<sup>2</sup> Ю.А., Алексеев<sup>3</sup> А.А.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> hukita23@mail.ru

<sup>2</sup> gusev.ura229@yandex.ru

<sup>3</sup> aa.alekseev@inbox.ru

## **ОСОБЕННОСТИ И СРЕДСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Аннотация.** Рассматриваются особенности компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах, и раскрывается ее физическая сущность. Проведён анализ основных устройств компенсации реактивной мощности: рассмотрены их конструктивные и функциональные характеристики, выполнен сравнительный анализ преимуществ и недостатков каждого типа устройств. На основе полученных результатов в заключительной части работы сформулированы выводы о наиболее перспективных решениях в области компенсации реактивной мощности с учётом современных требований к надёжности и эффективности электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** реактивная мощность, компенсация реактивной мощности, электроэнергетическая система, регулирование напряжения, батарея статических конденсаторов, шунтирующий реактор, статический компенсатор

**Egorov<sup>1</sup> N.A., Gusev<sup>2</sup> Y.A., Alekseev<sup>3</sup> A.A.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> hukita23@mail.ru

<sup>2</sup> gusev.ura229@yandex.ru

<sup>3</sup> aa.alekseev@inbox.ru

## **FEATURES AND MEANS OF COMPENSATING REACTIVE POWER IN ELECTRIC POWER NETWORKS**

**Abstract.** The article examines the features of reactive power compensation in electric power systems and elucidates its physical nature. The authors have conducted an analysis of the main reactive power compensation devices: their design and functional characteristics are reviewed, and a comparative analysis of the advantages and disadvantages of each device type is carried out. Based on the obtained results, the final section of the paper presents conclusions on the most promising solutions in the field of reactive power compensation, taking into account modern requirements for the reliability and efficiency of electric power systems.

**Keywords:** reactive power, reactive power compensation, electric power system, voltage regulation, static capacitor bank, shunt reactor, static compensator

В современных электроэнергетических системах одной из ключевых задач является обеспечение надежности и эффективности передачи электрической энергии. Существенное влияние на данные показатели оказывает реактивная мощность, которая сопровождает процессы передачи и преобразования энергии в цепях переменного тока. Наличие реактивной мощности приводит к увеличению потерь электроэнергии, снижению пропускной способности линий электропередачи и ухудшению качества напряжения. В связи с этим возникает необходимость ее компенсации, что определяет актуальность темы.

Реактивная мощность – это величина, характеризующая нагрузки, создаваемые в электротехнических устройствах колебаниями энергии электромагнитного поля в цепи синусоидального переменного тока, равна произведению среднеквадратичных значений напряжения  $U$  и тока  $I$ , умноженному на синус угла фаз между ними (если ток отстает от напряжения, сдвиг фаз считается положительным, если опережает – отрицательным).

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

При наличии в цепи индуктивной нагрузки ток отстает от напряжения, что соответствует положительной реактивной мощности. В этом случае энергия в течение первого положительного полупериода поступает от генератора в катушку и запасается в виде энергии магнитного поля, а в течение второго возвращается обратно. Среднее значение активной мощности потребляемой идеальной индуктивностью, за период равно нулю.

При емкостной нагрузке, наоборот, ток опережает напряжение, а реактивная мощность имеет емкостной характер. Энергия накапливается в электрическом поле. В течение первой и третьей четвертей периода напряжение на зажимах конденсатора уменьшается от максимального значения до нуля и конденсатор разряжается, а в течение второй и четвертой четвертей – увеличивается от нуля до максимального значения и конденсатор заряжается. Как и для индуктивного элемента, среднее значение активной мощности идеальной емкости за период равно нулю.

В реальных электроэнергетических системах преобладают смешанные нагрузки, содержащие активную, индуктивную и емкостную составляющие. В этом случае мгновенная мощность изменяется во времени таким образом, что часть энергии необратимо преобразуется в полезную работу, а часть участвует в периодическом обмене

между источником и реактивными элементами, но энергия, поступающая от источника питания в цепь, больше энергии, возвращаемой обратно. Передача реактивной мощности по сети вызывает дополнительные потери активной мощности.

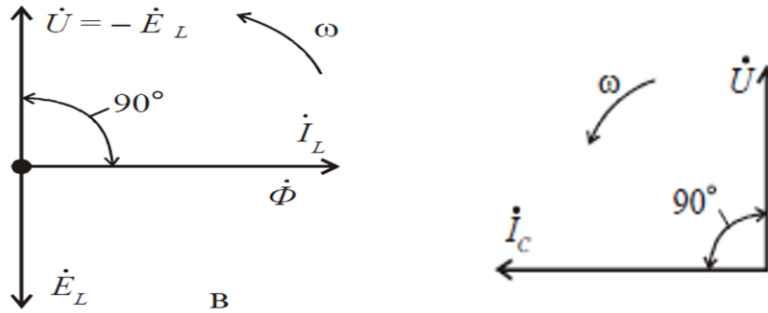


Рисунок 1 – Векторные диаграммы для цепи с индуктивными и емкостными элементами

В электроэнергетической системе реактивная мощность может как потребляться, так и генерироваться различными элементами сети. Основные потребители и источники реактивной мощности представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Потребители и источники реактивной мощности

Компенсация реактивной мощности представляет собой целенаправленное воздействие на баланс реактивной мощности в узле электроэнергетической системы с целью регулирования напряжения и снижения потерь электроэнергии. Средства компенсации реактивной мощности можно разделить на традиционные и активно-адаптивные.

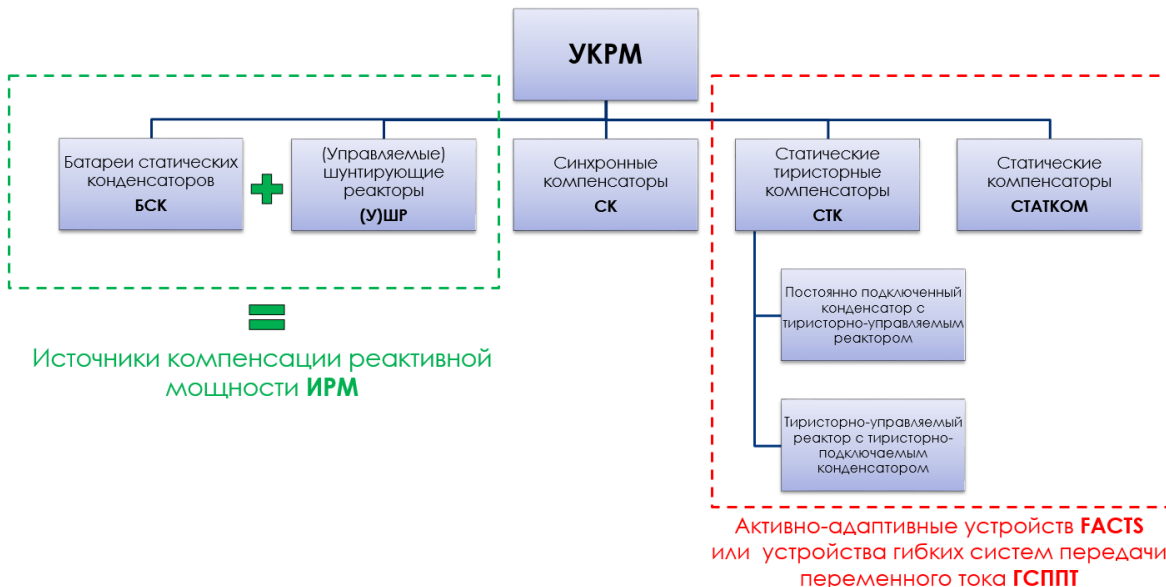


Рисунок 3 – Классификация устройств компенсации реактивной мощности

Батареи статических конденсаторов (БСК) предназначены для выдачи реактивной мощности в сеть. Конструктивно они представляют собой совокупность



последовательно и параллельно соединенных единичных конденсаторов, где число последовательных элементов определяет рабочее напряжение установки, а число параллельных ветвей – ее номинальную мощность. К недостаткам относятся: отрицательный регулирующий эффект, отсутствие плавного регулирования, поскольку изменение мощности носит ступенчатый характер, чувствительность к высшим гармоникам и броски тока и напряжения при коммутациях.

Шунтирующие реакторы (ШР), как элемент электроэнергетической системы, обычно используются на подстанциях или линиях электропередачи классов напряжения 330 кВ и выше. Шунтирующий реактор предназначен для компенсации избыточной емкостной мощности в ЛЭП. Конструктивно представляет из себя трансформатор без вторичной обмотки. Основными задачами шунтирующего реактора являются:

снижение напряжения на открытом конце воздушной или кабельной линии при их одностороннем включении на шины питающей сети;

ограничение так называемого «стока» избыточной мощности с воздушных или кабельных линий;

снижение уровня квазистационарных перенапряжений и энергии коммутационных перенапряжений.

Несмотря на значительный опыт эксплуатации и высокую степень распространённости, ШР обладают рядом существенных недостатков: отрицательный регулирующий эффект (способность генерировать реактивную мощность снижается при уменьшении напряжения на их зажимах), снижение пропускной способности линии при сохранении реактора в работе в режимах, близких к натуральной мощности, нежелательные коммутации, приводящие к скачкам напряжения и ускоренному износу выключателей, ограничения по режимам отключения в аварийных ситуациях.

Все перечисленные недостатки ШР преодолеваются путем их замены на управляемые шунтирующие реакторы (УШР). Применение управляемых шунтирующих реакторов позволяет повысить предел передаваемой мощности по условию статической устойчивости практически до значения ее натуральной мощности, что особенно актуально для протяженных линий

Перспективным направлением является применение комбинированных источников компенсации реактивной мощности (ИРМ), объединяющих управляемый шунтирующий реактор и батарею статических конденсаторов. Такое сочетание позволяет объединить преимущества плавного регулирования со стороны реактора и значительной емкостной мощности со стороны БСК. Это обеспечивает значительные ресурсы регулирования реактивной мощности для стабилизации напряжения за счет разгрузки сетей от потоков реактивной мощности и условия стабилизации и поддержания напряжения в эксплуатационных режимах.

Быстрое совершенствование силовых полупроводниковых приборов (тиристоров) привело к созданию и широкому внедрению статических тиристорных компенсаторов (СТК). Появление запираемых и силовых транзисторов привело к развитию новых технологий и разработке устройств с усовершенствованными характеристиками – статических синхронных компенсаторов (СТАТКОМ). Данные виды устройств получили обобщенное название устройств на базе технологии FACTS (от англ. *flexible alternating current transmission system* – управляемая система передачи переменного тока).

СТК представляет собой поперечно подключаемый источник или потребитель реактивной мощности, использующий тиристорные ключи для управления индуктивными и емкостными элементами. Его задача состоит в изменении реактивного тока таким образом, чтобы поддерживать заданные параметры режима, прежде всего напряжение на шинах. Преимущества СТК являются: плавное регулирование реактивного сопротивления, высокое быстродействие, предотвращение бросков тока, возможность использования конденсаторов как фильтров высших гармоник, высокая гибкость при работе как в нормальных, так и в аварийных режимах энергосистемы.

СТАТКОМ представляет собой статический синхронный компенсатор, подключаемый к сети поперечно и способный независимо от напряжения сети генерировать или потреблять реактивную мощность. Он обеспечивает поддержание заданных уровней напряжения посредством генерации или потребления реактивной мощности в точке его присоединения, при этом не требуется установки ни реакторов, ни батарей конденсаторов соответствующей мощности. СТАТКОМ обладают рядом преимуществ: практически мгновенное регулирование реактивной мощности, отсутствие необходимости в установке реакторов и конденсаторов большой мощности, независимость максимального выходного тока от напряжения сети, симметричность работы при различных уровнях напряжения, отсутствие вращающихся частей и низкий уровень гармоник.

Несмотря на значительные преимущества, устройства FACTS имеют ряд серьезных ограничений, сдерживающих их широкое применение: повышенные потери активной

мощности по сравнению с традиционными средствами компенсации, генерация высших гармоник, что требует применения фильтров и усложняет схему, необходимость специальных условий размещения и эксплуатации, включая системы охлаждения и более высокую квалификацию персонала, высокая стоимость, в том числе из-за необходимости согласующих трансформаторов и сложной силовой электроники, ограниченность отечественного опыта производства и эксплуатации некоторых видов оборудования.

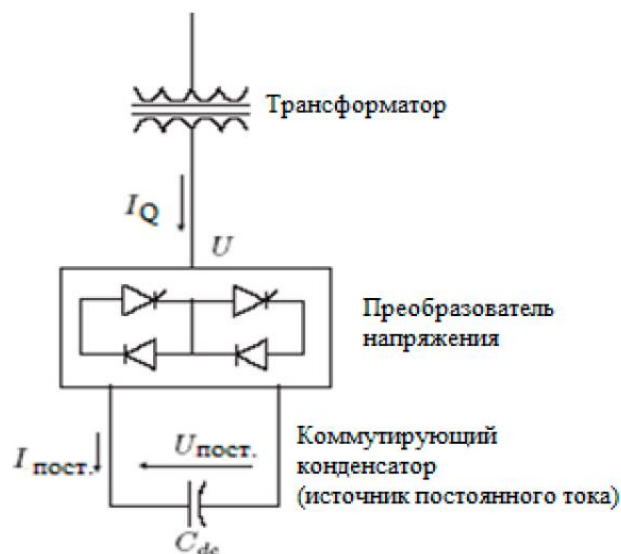


Рисунок 4 – Структурная схема СТАТКОМ

**Выводы.** Компенсация реактивной мощности является важной задачей для обеспечения надежного функционирования электроэнергетических систем, так как остается одним из наиболее эффективных способов снижения потерь электроэнергии и регулирования уровня напряжения в сети. Оптимизация потоков реактивной мощности позволяет увеличить пропускную способность существующих ЛЭП без значительных капиталовложений в сетевую инфраструктуру. Традиционные средства, такие как БСК и ШР сохраняют свою актуальность, благодаря низкой стоимости и простоте эксплуатации, однако наблюдается тенденция к использованию статических тиристорных компенсаторов и устройств на базе силовой электроники. Для достижения энергоэффективного управления современными электроэнергетическими сетями целесообразна реализация мероприятий по компенсации реактивной мощности на базе технологий FACTS, которые позволяют решать задачи не только статической компенсации, но и динамической устойчивости системы при переходных процессах, что критически важно в условиях интеграции возобновляемых источников энергии с их стохастическим характером генерации. При этом ограничением массового распространения устройств технологии FACTS является их высокая стоимость.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий – 2012.
2. Бабенко В.В., Хайченко И.А., Нефедов Ю.В. Особенности компенсации реактивной мощности в электроэнергетических сетях и системах
3. Тухватулин М.М., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., Урманова Ф.Ф. Анализ современных устройств FACTS, используемых для повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем России.

УДК 621.311

**Перетягин<sup>1</sup> А.В., Бростилов<sup>2</sup> С.А.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> eltech@pnzgu.ru

### МОДЕРНИЗАЦИЯ РП-2 «КАРАКОЗОВА» С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Аннотация.** В связи с истекающим сроком службы действующего оборудования, стратегической важностью для г. Пензы и повсеместным внедрением цифровых технологий, а также постоянным увеличением мощности запитанных от РП-2 «Каракозова» потребителей возникает острая необходимость в обновлении электрооборудования с использованием новейших технологий. Описываются все имеющиеся аргументы в пользу данной стратегии и методы ее реализации.

**Ключевые слова:** электрооборудование, распределительный пункт, социально значимые объекты

**Peretyagin<sup>1</sup> A.V., Brostilov<sup>2</sup> S.A.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> eltech@pnzgu.ru

### MODERNIZATION OF RP-2 "KARAKOZOV" TAKING INTO ACCOUNT MODERN TECHNOLOGIES

**Abstract.** Due to the expiration of the service life of the existing equipment, strategic importance for the city of Penza, and the widespread implementation of digital technologies, as well as the constant increase in the capacity of consumers powered from distribution point RP-2 "Karakozova" there is an urgent need to upgrade electrical equipment using the latest technologies. This article describes all the existing arguments in favor of this strategy and methods for its implementation.

**Keywords:** electrical equipment, distribution point, socially significant facilities

Распределительный пункт РП-2 «Каракозова» является ключевым звеном при передаче электроэнергии от ТЭЦ-1 на РП-17, запитывающий центральную часть г. Пензы, в которой находятся одни из важнейших потребителей электроэнергии. РП-2 «Каракозова» передает электроэнергию на 56 трансформаторных подстанций (ТП), от которых запитаны около 30 социально значимых объектов, в которые входят школы, больницы, котельные и насосные станции. Выход из строя такого стратегически важного звена в электроэнергетике может привести к серьезным экономическим, социальным, а также политическим последствиям для города Пенза.

Помимо этого, ситуация с выходом из строя устаревшего электрооборудования на ТЭЦ-1 в июле 2025 года наглядно продемонстрировала необходимость перехода РП-2 «Каракозова» на современное электрооборудование и техническую сложность в оперативных переключениях потребителей на резервную схему питания.

Учитывая, что, во-первых, РП-2 «Каракозова» была введена в эксплуатацию в середине 1970-1980 годах и оборудована в распределительных устройствах РУ-6 кВ 45 выкатными ячейками типа КВ-36/13, выпускающихся в 1960-1990 годах, содержащими в себе выключатель ВМП-10К и разъединители РВ-10, во-вторых, помимо технического обслуживания никаких капитальных ремонтов не производилось, можно сказать, что модернизация РП-2 «Каракозова» является острой необходимостью.

Также, аргументом этого является график, изображенный на рисунке 1, 2, 3, на которых изображено реальное потребление мощности потребителями с 2022 по 2025 годы.

Проанализировав данные графики, можно сказать, что в среднем потребление мощности увеличивается с каждым годом на 14%.

Подкрепляя эти данные имеющимися тремя кабельными линиями от ТЭЦ-1 до РП-2 «Каракозова» на каждую секцию РП-2 «Каракозова» марки АСВ-3\*240 можно рассчитать их предельно допустимое значение тока:

$$I_{\text{пр расч.}} = \frac{P_{\text{max}}}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi} * k_{\text{st}} * k_N;$$

где:  $I_{\text{пр расч.}}$  – предельно допустимое значение тока, А;

$P_{\text{max}}$  – максимальная мощность, кВт;

$U$  – напряжение, кВ;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности;

$k_{\text{st}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий старение (для кабельной линии, находящейся в эксплуатации более 30 лет) [1];

Согласно ПУЭ табл. 1.3.16. найдем значение допустимого длительного тока для кабеля с алюминиевыми жилами, прокладываемые в земле:

$$I_{\text{max}} = 390 * N * k_N = 390 * 3 * 0,85 = 994,5 \text{ А.}$$

где:  $N$  – количество кабельных линий, прокладываемых в земле;

$k_N$  – поправочный коэффициент на количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле ( $N=3$ ) [1].

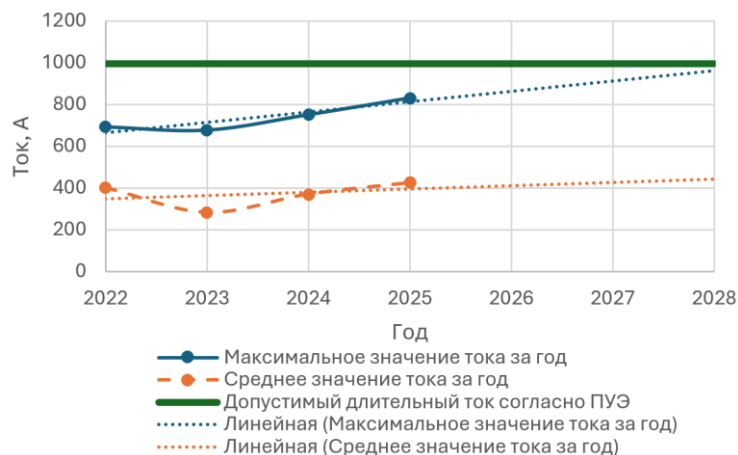


Рисунок 1 – Динамика изменения тока на 1 секции шин РП-2 «Каракозова»

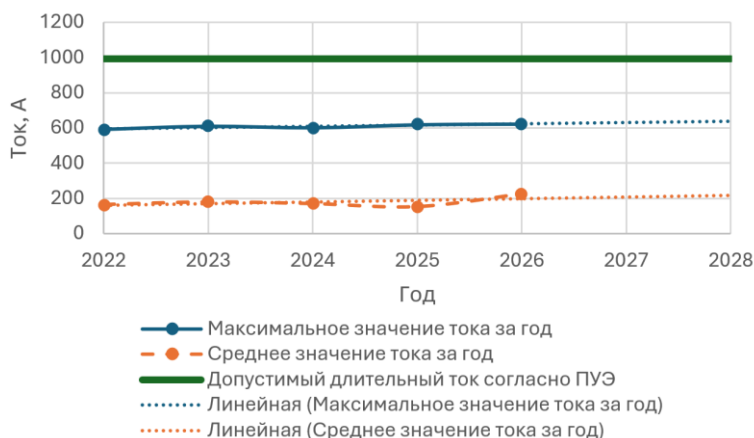


Рисунок 2 – Динамика изменения тока на 2 секции шин РП-2 «Каракозова»

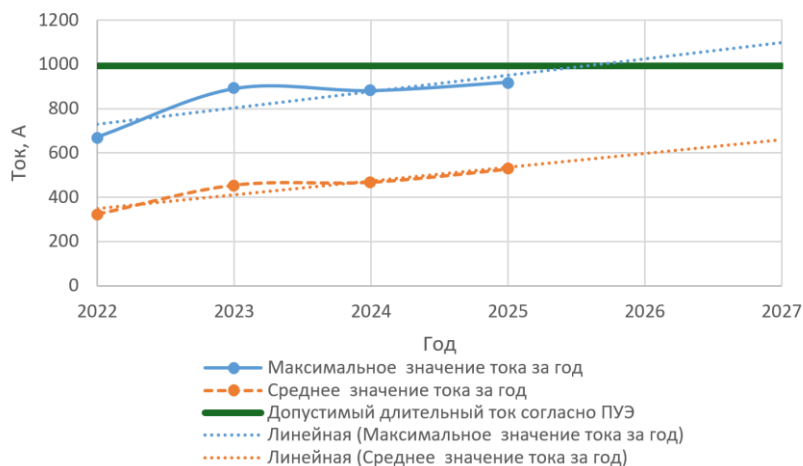


Рисунок 3 – Динамика изменения тока на 3 секции шин РП-2 «Каракозова»

Подводя итоги, на полученных графиках видно, что по первой секции шин РП-2 «Каракозова» значения тока превысит предельно допустимое значение к 2026 году, а по третьей секции шин к 2028 году.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М. : КноРус, 2011. 488 с.
2. Особенности проектирования системы электроснабжения комплекса инженерных технических средств охраны /Шевандронов Н.А., Бростилова Т.Ю., Бростилов С.А.//Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2025. Т. 2. С. 121-123.
3. Проектирование современной цифровой подстанции /Массальский Е.В., Радаикин Д.А., Бростилов С.А.//В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шлядинские чтения – 2025"). Материалы XVII Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для обучающихся и молодых ученых. Пенза, 2025. С. 294-299.

УДК 620.9

**Цыбарев<sup>1</sup> Д.В., Голобоков<sup>2</sup> С.В.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> eltech@pnzgu.ru

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ АККУМУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Аннотация.** Рассматривается концепция проектирования солнечных электростанций, оснащённых системами аккумуляции электрической энергии. Анализируются современные подходы к выбору оборудования, технологиям хранения энергии и интеграции систем в сетевое хозяйство. Особое внимание уделяется преимуществам и вызовам внедрения аккумуляторных батарей, а также экономической эффективности подобных решений. Предложены рекомендации по оптимальному проектированию таких систем для повышения их надёжности, энергоэффективности и возможности использования в условиях повышенной неустойчивости поставок электроэнергии. Работа предназначена для инженеров, проектировщиков и специалистов в области возобновляемых источников энергии.

**Ключевые слова:** солнечные электростанции, солнечные электростанции с аккумуляцией, хранение энергии, энергосбережение, возобновляемые источники энергии, проектирование энергетических систем, аккумуляторные батареи, электроснабжение

**Tsybarev<sup>1</sup> D.V., Golobokov<sup>2</sup> S.V.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> eltech@pnzgu.ru

## **DESIGN OF A SOLAR POWER PLANT WITH THE ABILITY TO STORE ELECTRICAL ENERGY**

**Abstract.** The article discusses the concept of designing solar power plants (SPPs) equipped with electric energy storage systems. It analyzes modern approaches to equipment selection, energy storage technologies, and integration of these systems into the power grid. The article focuses on the advantages and challenges of implementing battery storage systems, as well as the economic feasibility of such solutions. It provides recommendations for the optimal design of these systems to enhance their reliability, energy efficiency, and adaptability to unstable electricity supply conditions. This article is intended for engineers, designers, and professionals in the field of renewable energy sources.

**Keywords:** solar power plants, solar power plants with storage, energy storage, energy conservation, renewable energy sources, energy system design, batteries, power supply

Устойчивое развитие и необходимость перехода к возобновляемым источникам энергии становятся особенно актуальными в условиях 21 века, когда мировое общество сталкивается с последствиями изменения климата и истощением углеродных ресурсов. В связи с этим растёт интерес к возобновляемым энергетическим системам (ВЭС), которые способны существенно сократить экологическую нагрузку и обеспечить устойчивый энергоснабжение.

Однако одной из главных проблем при эксплуатации ВЭС является переменный характер генерации электроэнергии, что приводит к необходимости в накоплении избытка произведённой энергии. Электрическая энергия, произведённая в момент пиковой выработки, зачастую оказывается невостребованной, и без эффективной системы аккумуляции может быть потеряна. Это создаёт потребность в проектировании уникальных технических решений, которые обеспечат интеграцию ВЭС с временными системами аккумулирования энергии.

Научная работа направлена на изучение методов проектирования ВЭС, способных не только генерировать электроэнергию из возобновляемых источников, но и эффективно аккумулировать её для дальнейшего использования. В рамках данной работы будет рассматриваться как существующие технологии, так и новые подходы к интеграции аккумуляторов различного типа, что позволит создавать более надёжные и экономически целесообразные системы.

**Актуальность.** В последнее десятилетие проблема устойчивого развития и перехода на альтернативные источники энергии стала одной из основных задач для государств и исследовательских организаций.

С увеличением потребления электрической энергии, вызванным как ростом численности населения, так и развитием технологий, требуется более надёжный и гибкий подход к производству и распределению электричества. ВЭС могут играть ключевую роль в энергетическом балансе, но необходимо преодолеть ограничения, связанные с колебаниями генерации.

Аккумуляция энергии на уровне одной смены позволяет:

- Увеличить стабильность работы электрической сети;
- Снизить потери энергии при передаче;
- Оптимизировать расходы на электроснабжение за счёт использования ветровой энергии в часы пик нагрузки;
- Способствовать интеграции ВЭС в существующие энергетические системы.

Современные технологии аккумуляции, такие как литий-ионные батареи, систему накопления энергии на основе насосно-аккумулирующих станций и суперконденсаторы,

открывают новые горизонты для проектирования ВЭС. Исследования в этой области позволяют выявить оптимальные решения, которые повышают такой показатель, как коэффициент использования установленной мощности СЭС.

Переход на энергию из возобновляемых источников, включая ветер, способствует снижению углеродного следа и минимизации негативного влияния на окружающую среду. Это особенно актуально в контексте глобального изменения климата и международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов.

**Объектом исследования** является солнечная электростанция с интегрированной суперконденсаторной системой накопления электрической энергии.

**Практическая значимость.** Заключается в ее потенциале для создания реальных, эффективных и устойчивых систем энергоснабжения, которые могут быть применены в различных областях, способствуя развитию возобновляемой энергетики и решая конкретные проблемы электроснабжения. Работа имеет не только теоретическую, но и прикладную значимость, а ее результаты могут быть использованы в реальной практике.

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) представляют собой природные ресурсы, постоянно существующих процессов, а также энергоресурсы продуктов жизнедеятельности биоценозов растительного и животного происхождения. Характерной особенностью ВИЭ является их способность восстанавливаться в течение относительно короткого времени. Эти источники играют ключевую роль в мировом переходе к устойчивому энергоснабжению, снижении зависимости от ископаемых видов топлива и уменьшении воздействия на окружающую среду. [1]

Генеральной Ассамблеей ООН в соответствии с резолюцией 33/148 (1978 г.) введено понятие «новые и возобновляемые источники энергии», однако, с момента ввода в действие резолюции прошло много времени. Резолюцией, в основные формы ВИЭ выделяют: солнечную, геотермальную, ветровую, энергию морских волн, приливов океана, энергию биомассы древесины, древесного угля, торфа, тяглового скота, сланцев, битуминозных песчаников, гидроэнергию.

Развитие возобновляемой энергетики в России насчитывает несколько ключевых этапов:

- Начало (1970-е – 1990-е годы):

В 1970-х годах начались первые эксперименты с солнечными панелями и ветровыми установками. Основное внимание уделялось научным исследованиям и разработкам.

- Постсоветский период (1990-е годы):

После распада СССР наблюдался упадок многих энергетических проектов, включая возобновляемую энергетику. Однако небольшие установки начали появляться в отдаленных регионах, где отсутствовала традиционная энергетическая инфраструктура

- Возрождение интереса (2000-е годы):

С 2000-х годов возобновляемая энергетика начинает получать поддержку со стороны государства. Внедрение новых технологий, таких как ветряные и солнечные электростанции, началось в отдельных регионах, особенно в южных и северных частях страны.

- Законодательство и программы (2010-е годы):

В 2010 году Россия приняла закон о поддержке возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что стало значительным шагом вперед. Запущены механизмы поддержки, включая введение «зеленых» тарифов и конкурсов по отбору проектов ВИЭ.

- Текущие достижения и вызовы (2020-е годы):

В последние годы наблюдается рост установленной мощности ВИЭ, особенно в солнечной и ветровой энергетике. Тем не менее, основными препятствиями остаются высокая стоимость технологий, нехватка инвестиций и недостаток развитой инфраструктуры для интеграции ВИЭ в энергосистему, так как ВИЭ остается развивающейся отраслью и ее применение объективно в условиях отсутствия электроснабжения, а также наличия допустимого энергопотенциала для генерирующего оборудования.

На наиболее распространенных видах ВИЭ, имеющихся в России остановимся подробнее [4]:

- Солнечная энергия: используется для генерации электроэнергии посредством солнечных панелей (фотоэлектрических преобразователей) и солнечных тепловых установок.

Вместе с тем, уровень развития ВИЭ в разных странах продолжает существенно различаться. Это связано с особенностями их ресурсного потенциала, но в большей степени – с разными сроками запуска программ поддержки ВИЭ и их эффективности.

Мировыми лидерами по установленной электрической мощности ВИЭ являются Китай, США, Бразилия, Индия и Германия, на долю которых приходится порядка 58,4 % общей мировой установленной электрической мощности ВИЭ.

Результаты исследования представлены в таблице 1.



Рисунок 1 – Самарская СЭС

– Энергия ветра: Энергия, получаемая при помощи ветровых турбин, преобразующих кинетическую энергию ветра в электрическую.



Рисунок 2 – Адыгейская ВЭС

– Гидроэнергия: Генерация электроэнергии путем использования потока воды, обычно через гидроэлектростанции.

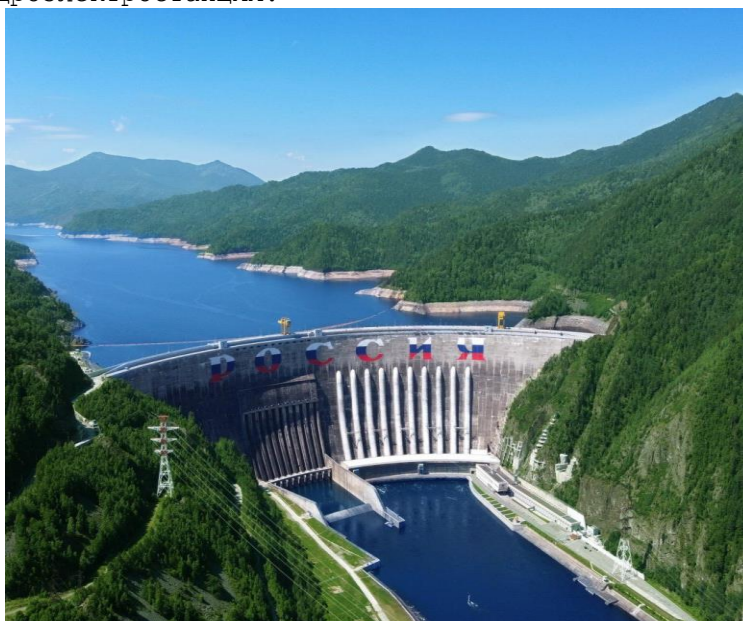


Рисунок 3 – Саяно-Шушенская ГЭС



Топ 5 стран по установленной мощности ВИЭ  
по состоянию на 1 января 2026 года [2]

Таблица 1

| Тип ВИЭ | Китай | США   | Бразилия | Индия | Германия |
|---------|-------|-------|----------|-------|----------|
| ГЭС     | 354,5 | 80    | 109,4    | 46,8  | 5,4      |
| ВЭС     | 307   | 95,2  | 13,1     | 49,7  | 58,5     |
| СЭС     | 329   | 132,7 | 21,2     | 40,1  | 63,8     |
| Всего:  | 990,5 | 307,9 | 143,7    | 136,6 | 127,7    |

Для решения одной из основной проблемы солнечной генерации – неустойчивости выработки, низкой плотности энергии предлагается рассмотреть современные системы хранения электрической энергии.

Для электростанции со среднесуточной мощностью около 10 МВА необходимо иметь запас электроэнергии на 3 суток простоя, примерно 720 МВтч. Соответственно, одним из вариантов решения основных недостатков проектируемой СЭС устойчивость и надежность – это запастись электроэнергией, произведенную ранее, в промышленных масштабах. Предметом решения могут стать активно развивающиеся различные системы накопления электроэнергии.

Системы накопления электроэнергии используют различные принципы – электрические, механические, водородные, пневматические и гидравлические. [3].

Наиболее перспективным направлением стали суперконденсаторы, которые применяются в системах накопления электроэнергии. Суперконденсаторы – это уникальные устройства, которые способны накапливать и хранить энергию при очень высокой плотности энергии. Они обладают высокой энергоемкостью и способностью быстро заряжаться и разряжаться, имеют широкий диапазон рабочих температур от -40 до 65 °С, срок службы не менее 10 лет (миллион циклов заряда/разряда), что исключает необходимость частых замен и снижает эксплуатационные издержки, что делает их идеальными для использования в различных устройствах большой мощности.

#### Выводы и заключение

Проектирование солнечных электростанций с возможностью аккумуляции – это сложный и все более актуальный процесс, который требует комплексного подхода и глубокого анализа. Современные технологии хранения энергии позволяют значительно повысить эффективность и надежность солнечных электросетей, обеспечивая стабильное электроснабжение в условиях переменной солнечной радиации и потребления. В условиях растущего спроса на возобновляемую энергию оптимизация системы, выбор подходящих компонентов и продуманная архитектура позволяют не только снизить затраты, но и преодолеть основные ограничения, связанные с переменчивостью источника.

Несмотря на существующие вызовы – высокую стоимость аккумуляторов, ограниченный срок службы и технические сложности – развитие инновационных технологий и механизмы поддержки государственных программ делают проектирование СЭС с аккумуляцией одним из перспективных направлений в энергетике. В будущем ожидается расширение спектра используемых технологий хранения, снижение стоимости и увеличение срока службы аккумулирующих систем, что откроет новые возможности для масштабного внедрения автономных и гибридных энергетических решений.

В целом, комплексное развитие этой сферы способствует переходу к экологически чистой, устойчивой и экономически выгодной энергетике, что соответствует глобальным целям борьбы с изменением климата и обеспечению энергонезависимости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устойчивое развитие: концепция, принципы, цели. – URL : <https://csrjournal.com/ustojchivoe-razvitie-koncepciya-principy-celi> (дата обращения 11.09.2024). – Текст : электронный.
2. World-Weather [сайт]. – <https://world-weather.ru> (дата обращения 05.04.2026).
3. СПРАВОЧНИК ПО ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА. НИК ВШЭ, 2016. 96 с.
4. Системы накопления электроэнергии [сайт] – <https://titanps.ru> (дата обращения 05.04.2026)



УДК 621.396.96:519.2:004.032.26

**Zhashkova<sup>1</sup> T.V., Mikhееv<sup>2</sup> M.Yu., Pepel<sup>3</sup> L.N.M., Kuvshinova<sup>4</sup> E.V.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

<sup>4</sup> Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

<sup>1</sup> tzhaskova@gmail.com

<sup>2</sup> mix1959@gmail.com

<sup>3</sup> nadiya.mix@gmail.com

<sup>4</sup> kuvsinovae793@gmail.com

### **ASSESSING THE RELIABILITY OF NAVIGATION SOLUTIONS UNDER REFERENCE-OBJECT, RECOGNITION ANOMALIES USING A SMALL-SCALE NEURAL NETWORK**

**Abstract.** This article addresses the problem of assessing the reliability of navigation solutions for mobile robots when anomalies occur in the recognition of reference objects. A hybrid method is proposed that combines an adaptive Kalman filter with a small-scale neural network to classify three types of anomalies: false detection, missed detection, and reference-object substitution. The neural network analyzes five features in real time, including measurement residuals and their variances, and produces a probabilistic estimate of the current operating mode. Based on the network output, an integral reliability index is constructed, enabling adaptive adjustment of the weight assigned to reference-object measurements. Computational simulation results for a robot motion scenario with two reference objects showed a 45% reduction in the root mean square positioning error, a 2.6-fold reduction in the maximum error, and an increase in the proportion of reliable solutions from 51 to 92% compared with a classical Kalman filter. The anomaly detection time was reduced to 0.6 s under an acceptable computational load of 0.55 ms per step.

**Keywords:** reference objects, recognition anomalies, Kalman filter, reliability of navigation solutions, adaptive filtering, anomaly classification, neural network

**Жашкова<sup>1</sup> Т.В., Михеев<sup>2</sup> М.Ю., Пепель<sup>3</sup> Л.Н.М., Кувшинова<sup>4</sup> Е.В.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

<sup>4</sup> Пензенский государственный архитектурно-строительный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> tzhaskova@gmail.com

<sup>2</sup> mix1959@gmail.com

<sup>3</sup> nadiya.mix@gmail.com

<sup>4</sup> kuvsinovae793@gmail.com

### **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭТАЛОННОГО ОБЪЕКТА, РАСПОЗНАВАНИЕ АНОМАЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОМАСШТАБНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

**Аннотация.** Рассматривается проблема оценки надежности навигационных решений для мобильных роботов при возникновении аномалий в распознавании эталонных объектов. Предложен гибридный метод, сочетающий адаптивный фильтр Калмана с маломасштабной нейронной сетью для классификации трех типов аномалий: ложного обнаружения, пропущенного обнаружения и замены эталонного объекта. Нейронная сеть анализирует пять характеристик в режиме реального времени, включая результаты измерений и их отклонения, и выдает вероятностную оценку текущего режима работы. На основе выходных данных сети строится интегральный показатель надежности, позволяющий адаптивно корректировать вес, присвоенный измерениям эталонного объекта. Результаты компьютерного моделирования сценария движения робота с двумя эталонными объектами показали снижение среднеквадратичной ошибки позиционирования на 45%, максимальной ошибки в 2,6 раза и увеличение доли надежных решений с 51 до 92%.

**Ключевые слова:** эталонные объекты, аномалии распознавания, фильтр Калмана, надежность навигационных решений, адаптивная фильтрация, классификация аномалий, нейронная сеть

In modern navigation systems for mobile robots and ground vehicles, positioning methods based on reference objects are becoming increasingly widespread. These reference objects are artificial or natural landmarks whose coordinates are known with high accuracy. Examples include radio beacons such as UWB and Bluetooth, visual markers such as QR codes and ArUco markers, LiDAR-reflective elements, and distinctive map features, including building corners and road signs [1]. Integrating measurements from reference objects into a navigation filter, usually a Kalman filter or one of its modifications, can significantly improve the accuracy and reliability of coordinate estimation, especially when satellite signals are only partially available, such as in urban areas, tunnels, and industrial facilities.

In practice, however, the effectiveness of reference-object-based positioning depends directly on recognition quality. The recognition system, whether based on a camera, LiDAR, or radio receiver, may fail due to changes in illumination, occlusion, electromagnetic interference, or limitations of computer vision algorithms. As a result, recognition anomalies may occur, that is, situations in which the information about a reference object supplied to the navigation filter does not correspond to reality [2]. Typical anomalies include false detection of a reference object where none exists, missed detection of an actually existing reference object, and incorrect identification of one reference object as another, referred to as substitution. Such anomalies may lead to abrupt

outliers in coordinate estimates, gradual drift, or hidden accumulation of error, ultimately reducing the reliability of navigation solutions, understood as the degree to which the obtained estimate corresponds to the true state of the object.

Classical navigation filters, including adaptive versions of the Kalman filter, assume that measurements from reference objects are either always correct or that their failures can be described by a simple model, such as signal loss [3, 4]. They do not account for the possibility of false detection or reference-object substitution. Consequently, when such anomalies occur, the filter continues to "trust" erroneous data, leading to unacceptable degradation in accuracy and, in some cases, loss of system operability. Simple residual-threshold rejection methods, such as the  $3\sigma$  rule, are often insufficient, since in the case of reference-object substitution the residual may increase slowly and remain within admissible limits for a long time.

The problem of improving navigation reliability under sensor failures has been addressed in the works of both Russian researchers, including S.P. Dmitriev, O.A. Stepanov, and A.V. Girin, and international researchers, including P.S. Maybeck and X.R. Li. Widely used approaches include multiple-model methods, Bayesian hypothesis testing, and adaptive filters with noise covariance estimation [5, 6]. However, these methods are primarily focused on anomalies in the measurements themselves, such as outliers and noise, rather than on object-recognition errors. In computer vision, a substantial body of research is devoted to false detection and marker classification, including methods for verifying the reliability of ArUco markers. However, these approaches are generally not integrated with navigation filters and do not provide a quantitative assessment of their effect on positioning reliability. The available literature contains insufficient evidence of hybrid approaches that combine adaptive Kalman filtering with neural-network-based classification of anomaly types specifically for reference objects.

The aim of this study is to develop a method for quantitatively assessing the reliability of navigation solutions under reference-object recognition anomalies. The method is intended to classify the anomaly type, namely false detection, missed detection, or substitution, and to adjust the reliability index accordingly.

To achieve this aim, the following tasks are formulated: to classify reference-object recognition anomalies that are most significant for navigation tasks; to develop the architecture of a small-scale neural network capable of determining the current anomaly type in real time using available features, including measurement residuals and their variances; to construct an integral reliability index  $D_k$  that combines the network output with residual statistics and to determine decision thresholds; and to perform computational simulations for a typical robot motion scenario with two reference objects, simulating all three anomaly types and comparing the proposed method with a classical Kalman filter and simple threshold-based rejection.

In this study, a navigation anomaly is understood as any abnormal change in the statistical properties of the measurement channel that is not accounted for by the prior model. In the navigation of mobile robots and unmanned aerial vehicles, three main types of such anomalies are most commonly encountered.

The first type (A1) is an impulse anomaly, represented by a single measurement outlier exceeding  $5\sigma$  relative to the nominal variance. This type of anomaly may be caused by short-term GNSS receiver failures or electromagnetic interference [7].

The second type (A2) is an interval anomaly, characterized by an increase in measurement-noise variance over a time interval of 5 to 20 seconds. A typical example is movement under a bridge or through a tunnel [8].

The third type (A3) is a drift anomaly, manifested as a slow shift in the mean value of the measured quantity, for example due to temperature drift of an inertial sensor or changes in tropospheric delay [9].

Table 1 presents the three types of reference-object recognition anomalies considered in this study. Each type is assigned an alphanumeric index, along with a brief description and a typical cause. This classification is subsequently used for training the neural network and interpreting the simulation results.

The listed types of anomalies affect the reliability of navigation estimates in different ways: an impulse anomaly causes a sharp decrease in the reliability index, an interval anomaly leads to its gradual decrease, whereas a drift

anomaly may remain undetected for a long time despite a significant accumulation of positioning error.

Types of reference-object recognition anomalies

Table 1

| Name             | Brief description                                              | Typical cause                         |
|------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| False detection  | A reference object is reported, but it is not actually present | Glare, camera noise                   |
| Missed detection | A reference object is present but not recognized               | Occlusion, insufficient illumination  |
| Substitution     | A reference object is confused with another one                | Similar markers, classification error |

Let us consider a standard navigation-system model in which the state vector  $x_k$  includes the robot coordinates and velocity. Measurements are obtained from two sources: satellite navigation (GNSS) and reference objects. A reference object with known coordinates  $x_{ref}$  at the moment of its tentative recognition, provides a range measurement:

$$z_k^{ref} = \|x_k - x_{ref}\| + v_k^{ref}, \quad v_k^{ref} \sim N(0, \sigma_{ref}^2).$$

However, due to recognition anomalies, the actually obtained measurement may correspond to:

- a false reference object (A1), in which case no true reference object exists and the measurement is random noise;
- a missed detection (A2), in which case the measurement is absent although it should be available;
- substitution (A3), in which case the measurement corresponds to another reference object with coordinates  $x'_{ref} \neq x_{ref}$ .

Thus, the main task is to determine in real time whether an anomaly is present and, if so, to which type it belongs, in order to adjust the reliability index and take appropriate measures, such as rejecting the measurement, reducing its weight, or requesting repeated recognition.

We use a standard Kalman filter with prediction and correction [3]. The innovation at step  $k$  is calculated as:

$$\tilde{z}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}$$

The theoretical innovation covariance is:  $S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k$ . To adapt to changing conditions, the empirical innovation covariance is estimated over a sliding window of length  $L = 5$ :

$$\hat{S}_k = \frac{1}{L} \sum_{i=k-L+1}^k \tilde{z}_i \tilde{z}_i^T$$

If  $\hat{S}_k$  differs significantly from the theoretical covariance  $S_k$ , this indicates a possible anomaly.

Instead of manually setting thresholds, we train a small neural network to recognize the anomaly type. The network architecture is as follows:

- Input layer: 5 neurons corresponding to the features listed below.
- One hidden layer: 10 neurons with ReLU activation.
- Output layer: 4 neurons with Softmax activation, corresponding to the classes: normal mode  $C_0$ , A1, A2, A3).

The total number of parameters is:  $5 \times 10 + 10 \times 4 = 90$ . Thus, the network is small-scale and can operate on a microcontroller.

The input features for the network at each step  $k$  available in real time, are:

1. Norm of the measurement residual from the reference object, if a measurement is available; otherwise, 0.
2. Sliding variance of the reference-object residual over the last three steps.
3. Norm of the GNSS residual, for comparison.
4. Ratio of the empirical variance to the theoretical variance for the reference-object channel.
5. Reference-object recognition flag: 0 or 1.

These features allow the network to distinguish false detection, characterized by a large residual when the reference object is absent, from missed detection, characterized by a zero recognition flag when the reference object is expected, and from substitution, in which the residual grows over time rather than abruptly.

Figure 1 presents the architecture of the small-scale neural network.

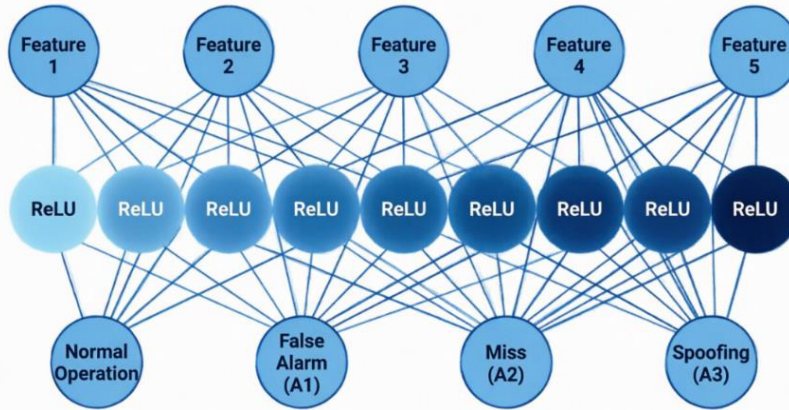


Figure 1 - Neural network architecture

Based on the network output, the reliability index  $D_k \in [0,1]$ :

$$D_k = p(C_0|f_k) \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{2(\|z_k^{ref}\|/\sigma_{ref}-1)}} \right)$$

Here  $p(C_0|f_k)$  is the probability of the normal mode according to the neural network output. The second factor is a penalty for large residuals of the reference object: if the residual exceeds  $\sigma_{ref}$ , the reliability decreases. If there is no reference-object measurement, the factor is taken as  $p(C_0|f_k)$ . If  $D_k$  falls below a threshold of 0.5, the solution is considered unreliable, and the reference-object measurement is either rejected or its weight  $R_k$  is temporarily increased by 10 times [4].

To evaluate the effectiveness of the proposed method, a computational experiment was conducted. The object of navigation was a mobile robot moving on a two-dimensional plane. The experiment parameters were specified as follows.

The state vector included the coordinates  $(x, y)$  and velocities  $(v_x, v_y)$ . The discretization step was  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ . Process noise was modeled with covariance  $Q = \text{diag}(0,01^2, 0,01^2, 0,05^2, 0,05^2)$  in units of  $\text{m}^2$  and  $(\text{m/s})^2$ . Navigation measurements were generated by two sources: satellite navigation (GNSS), with a position error standard deviation of 4 m for each coordinate, and reference objects.

Two reference objects with absolute coordinates (10,0) m and (20,0) m were placed in the motion area. The range to a reference object was measured with variance  $\sigma_{ref}^2 = 0.25$ . The reference-object recognition system could operate in normal mode or in a mode with three anomaly types: false detection (A1), missed detection (A2), and substitution (A3). Anomalies were introduced over specific time intervals according to Table 2.

Parameters of recognition anomalies

Table 2

| Anomaly type     | Designation | Time interval, s | Description                                                                   |
|------------------|-------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| False detection  | A1          | 5-7              | A reference object is reported, but is physically absent                      |
| Missed detection | A2          | 12-14            | A reference object is present but not recognized                              |
| Substitution     | A3          | 18-20            | Instead of reference object No. 2, reference object No. 1 is incorrectly used |

Three methods for processing navigation data were compared:

1. Classical Kalman filter (KF), without recognition-reliability control; all incoming measurements from reference objects are treated as true [3].

2. Kalman filter with threshold-based rejection (TR) – the measurement from the reference object is rejected if the residual norm exceeds  $3\sigma$ , where  $\sigma$  is calculated as the root mean square deviation corresponding to the stated accuracy [5].

3. Proposed hybrid method (HM) – an adaptive Kalman filter combined with a small-scale neural network and an integral reliability index  $D_k$ . When  $D_k < 0.5$  the measurement from the reference object is either rejected or its covariance is increased by a factor of 10.

Each method was tested on 50 independent realizations of random measurement and process noise. The quality assessment was carried out using the following indicators:

– root mean square positioning error (RMSE),

- maximum absolute error over the entire trajectory,
- proportion of time during which the reliability index  $D_k$  exceeded 0.7, characterizing the reliability of the method,
- average anomaly detection time, defined as the interval from the onset of an anomaly to the moment when  $D_k$  first fell below the threshold of 0.5.

Results of the computational experiment Table 3

| Method | Positioning RMSE, m | Maximum error, m | Proportion of reliable solutions ( $D_k > 0.7$ ) | Anomaly detection time, s |
|--------|---------------------|------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|
| KF     | 1.23                | 4.87             | 0.51                                             | –                         |
| TR     | 0.94                | 2.93             | 0.69                                             | 1.8                       |
| HM     | 0.68                | 1.85             | 0.92                                             | 0.6                       |

The presented data show that the classical Kalman filter (KF) gives the largest positioning error, with an RMSE of 1.23 m, and a low proportion of reliable solutions, 51%. Threshold-based rejection (TR) reduces the RMSE to 0.94 m and increases the proportion of reliable solutions to 69%. The proposed hybrid method (HM) provides the best results: the RMSE is reduced to 0.68 m, which is 45% lower than that of the KF; the maximum error decreases from 4.87 m to 1.85 m; and the proportion of reliable solutions reaches 92%. The anomaly detection time is reduced from 1.8 s for threshold-based rejection to 0.6 s.

Figure 2 shows the variation of the integral reliability index over time for the proposed method.

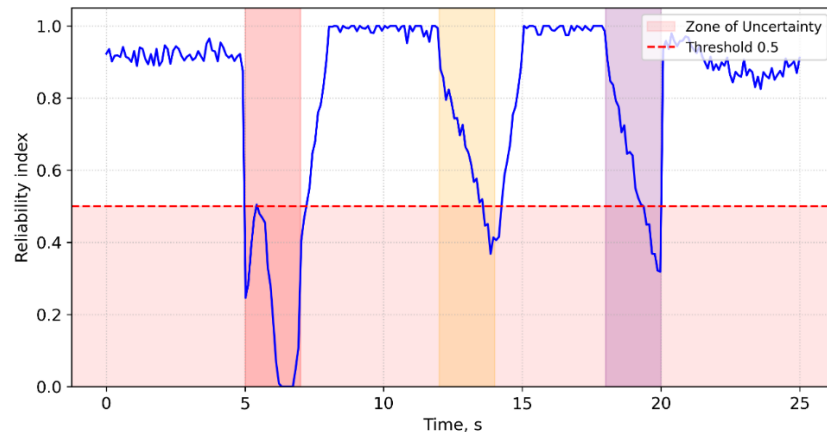


Figure 2 - Dynamics of the reliability index

During normal intervals, 0–5 s, 7–12 s, 14–18 s, and after 20 s, the value of  $D_k$  remains steadily above 0.85. During false detection (A1), the index drops sharply to 0.2; during missed detection (A2), it gradually decreases to 0.4; and during substitution (A3), it gradually decreases to 0.3. After the anomaly ends  $D_k$  quickly recovers to high values.

Figure 3 presents the measured execution time of one filtering step on a single-board. The classical Kalman filter requires 0.15 ms, the adaptive version requires 0.30 ms, and the proposed hybrid method with a neural network requires 0.55 ms. Thus, the additional computational load introduced by the neural network is 0.25 ms, which is acceptable for real-time systems with an update frequency of up to 100 Hz.

The proposed method is the first to explicitly link the quality of reference-object recognition with the reliability of navigation estimates. A small-scale neural network successfully classifies three types of anomalies, namely false detection, missed detection, and substitution, using simple features such as the residual and its variance. The integral reliability index makes it possible to automatically reduce the weight of suspicious measurements.

computer Raspberry Pi 4 with a frequency of 1.5 GHz.

Thus, a method has been developed for quantitatively assessing the reliability of navigation solutions under conditions of prior uncertainty. The method integrates an adaptive Kalman filter with measurement-noise covariance adjustment, measurements from a reference object, and a small-scale neural network for classifying three classes of navigation anomalies: impulse outliers, interval increases in variance, and slow drift. An integral reliability index  $D_k$  has been introduced, combining the network output and the likelihood of the reference residual. Numerical simulation results for a ground robot using GLONASS/GPS and two reference landmarks showed:

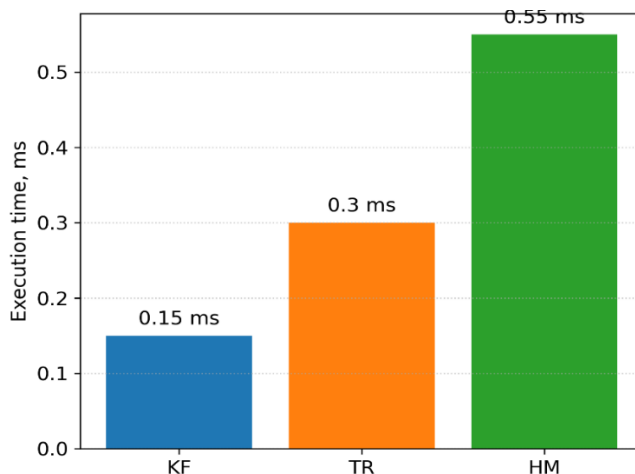


Figure 3 – Comparison of computational load

- a reduction in root mean square positioning error from 1.23 m, obtained with the classical Kalman filter, to 0.68 m;
- a reduction in the maximum error from 4.87 m to 1.85 m;
- an increase in the proportion of reliable solutions ( $D_k > 0.7$ ) from 51% to 92%;
- a reduction in anomaly detection time from 1.8 s to 0.6 s.

The proposed approach can be recommended for automatic control systems of mobile robots, unmanned aerial vehicles, and ground vehicles operating under conditions of prior uncertainty and possible navigation anomalies.

Further research will focus on extending the method to nonlinear systems, including the extended Kalman filter and ensemble filters, using deeper neural networks when sufficient computational resources are available, and conducting experimental validation on real robotic platforms.

The article was prepared with the support of Russian Science Foundation grant № 25-21-00445, "Research and development of a mathematical framework for minimizing deviations in the positions of 3D models of reference objects synthesized by simulator systems of aviation training simulators when observed in multi-spectral mode."

## REFERENCES

1. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями в задачах обработки навигационной информации. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2017. 532 с.
2. Дмитриев С.П., Козлов А.В., Пеша Ю.В. Адаптивные алгоритмы комплексирования инерциальных и спутниковых навигационных систем при аномальных измерениях // Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 8. С. 675-683.
3. Maybeck P.S. Stochastic Models, Estimation, and Control. – New York: Academic Press, 1982. Vol. 1. 423 p.
4. Li X.R., Jilkov V.P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005. Vol. 41, №4. Pp.1255-1321.
5. Mohamed A.H., Schwarz K.P. Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS // Journal of Geodesy. 1999. Vol. 73, №4. Pp. 193-203.
6. Гирин А.В., Петров Е.Г. Методы и алгоритмы адаптивной фильтрации в навигационных системах при априорной неопределенности // Гироскопия и навигация. 2020. Т.28, № 3. С. 45-61.
7. Noureldin A., El-Shafie A., Taha M.R. Optimizing Neuro-Fuzzy Modules for Data Fusion of INS/GPS in Vehicular Navigation // GPS Solutions. 2007. Vol. 11, №4. Pp. 281-293.
8. Katsikas S.K. Navigation Data Anomaly Analysis and Detection // Information. 2022. Vol. 13, №3. Pp. 104.
9. Миллер Б.М., Колосов К.С. Робастное оценивание на основе метода наименьших модулей и фильтра Калмана // Автоматика и телемеханика. 2020. №11. С. 72-92.
10. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – MIT Press, 2016. 800 p.
11. Цветков Э.И., Панкин А.М. Взаимосвязь достоверности результатов технической диагностики и точности диагностических измерений // Надежность и качество сложных систем. 2021. №3(35). С. 74-79.
12. Mikheev M.Yu., Hilal S., Pepel L.N. Generative neural networks: problems, development perspectives // Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality. 2024. Т. 1. С. 401-403.
13. Кувшинова О.А., Кувшинова Е.В. Применение целочисленного исследования для получения сегментов в 3D-модели районов полета // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2023. № 2 (17). С. 84-89.
14. Кувшинова О.А., Кувшинова Е.В. Применение нейронной сети для исключения из обработки активных сегментов в режиме реального времени // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2025. № 1 (56). С. 205-211.

УДК 629.735.4:681.2

**Вторых<sup>1</sup> Н.Р.**

<sup>1</sup> Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

<sup>1</sup> era\_otd2@mil.ru

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕНДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВИНТОМОТОРНЫХ ГРУПП БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Аннотация.** Выполнен сравнительный анализ стендов для контроля по основным техническим характеристикам. Систематизированы типовые источники погрешностей, влияющие на сопоставимость результатов. По итогам сформулированы практические критерии выбора стенда под задачи разработки, серийного контроля, учебных лабораторий и полевых испытаний.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, винтомоторная группа, электронный регулятор скорости, тяга, крутящий момент, обороты (RPM), калибровка, частота дискретизации

**Vtorikh<sup>1</sup> N.R.**

<sup>1</sup> Military Innovation Technopolis "ERA", Anapa, Russia

<sup>1</sup> era\_otd2@mil.ru

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF STANDS FOR DIAGNOSTICS OF PROPELLER-MOTOR GROUPS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

**Abstract.** A comparative analysis of the control stands according to the main technical characteristics was performed. The typical sources of errors affecting the comparability of the results are systematized. Based on the results, practical criteria for selecting a stand for the tasks of development, serial control, training laboratories and field testing were formulated.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, propeller-driven group, electronic speed controller, thrust, torque (RPM), calibration, sampling rate

### **1. Введение**

Под БПЛА в настоящей работе понимается летательный аппарат, выполняющий полёт без пилота на борту и использующий автоматическое либо дистанционное управление. Рост практического применения БПЛА в задачах мониторинга, доставки и технического контроля приводит к повышению требований к надёжности силовой установки и воспроизводимости её характеристик, поскольку отклонения по тяге и энергетике непосредственно отражаются на грузоподъёмности, продолжительности полёта и устойчивости управления. Одним из наиболее нагруженных и критичных узлов БПЛА является винтомоторная группа (ВМГ) – силовая установка, обеспечивающая создание тяги и управление ею в широком диапазоне режимов. Параметры ВМГ формируются совместным влиянием электрических, механических и аэродинамических факторов; при этом даже при неизменности отдельных компонентов итоговые характеристики могут существенно изменяться в зависимости от режима питания, настройки силовой электроники, качества охлаждения и жёсткости крепления. В связи с этим стендовая проверка ВМГ рассматривается как необходимый элемент инженерной верификации, позволяющий количественно оценивать тягу, потребляемую мощность и устойчивость работы на режимах, близких к эксплуатационным, а также выявлять неблагоприятные проявления, связанные с перегревом и вибрациями, которые часто неочевидны при кратковременных «настольных» проверках.

В типовом исполнении для электрических мультикоптеров и самолётных БПЛА ВМГ включает:

**воздушный винт (пропеллер)**, определяющий аэродинамическую нагрузку и КПД в заданном диапазоне скоростей;

**бесколлекторный электродвигатель постоянного тока** (как правило, BLDC – brushless DC motor);

**электронный регулятор скорости** (electronic speed controller – ESC), выполняющий коммутацию фаз и управление моментом/частотой вращения двигателя;

**источник питания** (аккумулятор или лабораторный источник), проводку и разъемы, которые вносят заметные потери и могут влиять на устойчивость работы ESC;

элементы крепления и силовую раму, которые определяют механическую жесткость, уровень вибраций и безопасность работы.

Проверка и стендовые испытания винтомоторной группы необходимы по нескольким причинам. В условиях вариативности комплектующих и режимов их эксплуатации требуется подтверждать соответствие фактических характеристик заявленным, поскольку значения тяги, потребляемого тока, частоты вращения и энергетической эффективности существенно зависят от сочетания «двигатель–электронный регулятор скорости–воздушный винт», напряжения питания, качества коммутации и условий охлаждения. Стендовые испытания обеспечивают возможность количественного сравнения альтернативных конфигураций и определения рациональных режимов работы по критериям тягово-энергетической эффективности, а также позволяют выявлять потенциально опасные эксплуатационные факторы, включая токовые перегрузки в переходных режимах, термическую напряженность двигателя и регулятора,



а также повышенный уровень вибраций, приводящий к ускоренному износу механических узлов и ухудшению качества работы систем управления. В результате стендовая диагностика формирует воспроизводимую экспериментальную базу для обоснования конструктивных решений, контроля качества и повышения надежности силовой установки БПЛА.



Рисунок 1 – схема БМГ БПЛА

2. Ретроспектива стендовых средств для контроля БМГ: этапы развития, характерные решения и типовые ошибки

Развитие стендов для испытаний винтомоторных групп беспилотных летательных аппаратов отражает переход от упрощенных оценочных измерений к многоканальным измерительным комплексам, ориентированным на воспроизводимость результатов и анализ причинно-следственных связей в работе силовой установки. На ранних стадиях практики измерение тяги, как правило, опиралось на механические способы регистрации силы (пружинные динамометры, рычажные приспособления), которые позволяли получить ориентировочные значения, но характеризовались высокой зависимостью от условий закрепления, влияния вибраций, субъективности считывания и отсутствия синхронизации с электрическими параметрами. В таких схемах измерительные данные описывали преимущественно единичные стационарные точки режима, что ограничивало их применимость для инженерного анализа эффективности и надежности.

С распространением доступных электронных измерителей и элементной базы малой автоматизации получили широкое распространение конструкции на основе электронных весов и рычажных механизмов, позволяющие оперативно сравнивать пропеллеры и двигатели в лабораторно-бытовых условиях. При внешней наглядности подобный подход сформировал характерные методические проблемы: влияние струи винта и рециркуляции воздушного потока на измерительный узел, паразитные силы и моменты из-за перекосов и трения в направляющих, а также сглаживание динамики вследствие встроенной фильтрации показаний. В результате такие стенды обеспечивали удобство подбора компонентов, однако при отсутствии калибровки и описания метрологических характеристик давали результаты ограниченной сопоставимости, особенно при анализе близких по эффективности конфигураций.

Современная практика испытаний БМГ ориентируется на интегрированные стенды, в которых механические и электрические параметры регистрируются синхронно и с заданной частотой дискретизации, а результаты автоматически сохраняются для последующей обработки. Использование тензометрических датчиков силы и реактивного момента, оптических и электрических методов измерения частоты вращения, встроенных измерителей тока и напряжения, а в более развитых системах – вибродиагностики и контроля температуры, обеспечивает переход от «измерения тяги» к диагностике режимов работы силовой установки. Такой подход позволяет исследовать переходные процессы, фиксировать токовые пики, оценивать вибрационный



профиль и тепловую напряженность узлов, что существенно повышает практическую ценность испытаний при разработке, серийном контроле и ресурсной оценке ВМГ.

### 3. Методы измерений и типовые источники ошибок

Сравнивать стенды корректно можно только через призму методов измерений: один и тот же параметр (например, обороты) может измеряться принципиально разными способами, с разными ограничениями. Ниже приведена таблица методов, применяемых в практике испытаний ВМГ.

Сравнительный анализ методов измерения характеристик ВМГ

Таблица 1

| Измеряемый параметр                          | Метод измерения                                   | Принцип действия                                                                    | Преимущества                                                                | Недостатки и ограничения                                                                                           |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Тяга</b>                                  | Тензометрический (Strain Gauge)                   | Изменение сопротивления тензорезистора при деформации упругого элемента.            | Хорошая линейность, высокая чувствительность, широкий выбор датчиков.       | Температурный дрейф нуля, гистерезис; чувствительность к боковым нагрузкам и перекоосу; требуется калибровка.      |
| <b>Тяга</b>                                  | Механический динамометр (пружинный)               | Удлинение пружины пропорционально силе.                                             | Простота, автономность.                                                     | Низкая точность, субъективность считывания, плохая динамика, вибрации сильно искажают показания.                   |
| <b>Тяга</b>                                  | Пьезоэлектрический датчик силы                    | Генерация заряда при деформации пьезоэлемента.                                      | Очень высокая динамика, полезен для быстрых процессов.                      | Сложность калибровки в статике; дрейф, зависимость от схемы усиления; редко применяется в «настолевых» стендах.    |
| <b>Крутящий момент</b>                       | Реактивный момент (Reaction Torque)               | Измерение реакции опоры через плечо на тензодатчик.                                 | Позволяет оценить КПД винта/двигателя; прямой канал момента.                | Требуется механика с минимальным трением и паразитными моментами; вибрации создают шум.                            |
| <b>Крутящий момент</b>                       | Встроенный датчик момента (in-line torque sensor) | Измерение деформации вала или торсионного элемента в линии передачи.                | Более «чистая» механика, хороший для высоких моментов и точной диагностики. | Дорого, сложнее интеграция; редко встречается в серийных стендах для БПЛА.                                         |
| <b>Обороты (Revolutions per minute, RPM)</b> | Оптический тахометр                               | Подсчет прерываний/отражений по метке.                                              | Прямое измерение механических оборотов, независимость от числа полюсов.     | Чувствительность к засветке/загрязнению; ограничения при очень высоких RPM и дрожании метки.                       |
| <b>Обороты</b>                               | Электрические обороты (eRPM)                      | Частота коммутации фаз двигателя/обратной ЭДС → обороты с учетом числа пар полюсов. | Быстрый отклик, не требует внешней оптики.                                  | Требуется корректного ввода числа пар полюсов; на низких оборотах возможна неустойчивость; чувствителен к помехам. |
| <b>Обороты</b>                               | Датчик Холла/магнитная метка                      | Подсчет импульсов от магнитной метки на валу.                                       | Устойчивость к освещению, простая схема.                                    | Требуется механической метки/магнита; ограничение по монтажу; добавляет «инородный» элемент на роторе.             |
| <b>Ток</b>                                   | Шунт                                              | Падение напряжения на прецизионном резисторе малого сопротивления.                  | Высокая динамика, хорошая точность при грамотной реализации.                | Нагрев → дрейф; потери мощности; требуется аккуратная измерительная схема (4-проводное включение).                 |
| <b>Ток</b>                                   | Датчик Холла                                      | Измерение магнитного поля вокруг проводника.                                        | Гальваническая развязка, меньше потерь.                                     | Погрешность на малых токах; чувствительность к внешним полям; ограниченная полоса частот у ряда датчиков.          |

|                    |                                          |                                                                   |                                                                             |                                                                                                                  |
|--------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ток</b>         | Катушка Роговского                       | Индуктивное измерение производной тока (интегрирование дает ток). | Очень широкая полоса частот, хорошо для импульсных токов.                   | Нужен интегратор; сложнее получить точный DC-уровень; редко применяется в компактных стендах.                    |
| <b>Напряжение</b>  | Делитель + АЦП (ADC)                     | Масштабирование напряжения и оцифровка.                           | Простота, достаточная точность при калибровке.                              | Требуется защиты от помех и выбросов; ошибка АЦП и делителя; нужна привязка к частоте дискретизации.             |
| <b>Мощность</b>    | Вычислительная ( $P=U \cdot I$ )         | Расчет по синхронно измеренным $U$ и $I$ .                        | Универсально и просто.                                                      | Ошибка возрастает при несинхронности каналов; при ШИМ-помехах нужны корректные фильтры/частота опроса.           |
| <b>Вибрации</b>    | MEMS-акселерометр                        | Микромеханический датчик ускорений, запись во времени.            | Компактность, доступность, возможен спектральный анализ.                    | Ограничение полосы и динамического диапазона; чувствительность к месту установки; требует правильной фильтрации. |
| <b>Вибрации</b>    | Пьезоэлектрический акселерометр          | Пьезоэлемент формирует сигнал при ускорении.                      | Высокая полоса частот и чувствительность, хорош для диагностики резонансов. | Требуется специализированного усилителя/согласования; обычно дороже.                                             |
| <b>Температура</b> | Термопара                                | ЭДС на спае двух металлов.                                        | Широкий диапазон, высокая стойкость.                                        | Требуется компенсации холодного спае; чувствительна к наводкам; точность сильно зависит от реализации.           |
| <b>Температура</b> | Инфракрасный датчик/пирометр, тепловизор | Бесконтактное измерение по тепловому излучению.                   | Безопасно, удобно для вращающихся частей/проводов.                          | Зависимость от эмиссивности поверхности, угла и расстояния; измеряет поверхность, а не внутренний нагрев.        |

Типовые источники ошибок (важные для интерпретации результатов стенда):

1. Паразитные силы и моменты в механике стенда. Перекос двигателя, изгиб консоли, трение направляющих дают смещение нуля и нелинейность.

2. Аэродинамическое влияние. Струя винта взаимодействует со столом, экраном, стойками и самим датчиком; при одинаковой ВМГ показания могут меняться только из-за геометрии установки.

3. Несинхронность каналов  $U$  и  $I$  при расчете мощности. Если напряжение и ток измеряются с разной задержкой/частотой, вычисленная мощность и производные показатели (например, тяга/ватт) искажаются.

4. Температурный дрейф тензодатчиков и шунтов. При длительных испытаниях ноль «уплывает», и без регулярного контроля это незаметно.

5. Недостаточная частота дискретизации. При низкой частоте опроса исчезает информация о переходных процессах: пики тока, колебания оборотов, резонансные компоненты вибраций.

4. Сравнение существующих стендов для диагностики ВМГ

В настоящей работе мы систематизировали характеристики распространенных стендов и свели их в Таблицу 2. В таблицу включены решения разных классов: от простых настольных до систем, рассчитанных на высокие напряжения и токи, регистрацию вибраций и температуры.

Вибродиагностика и температурный контроль реализуются преимущественно в стендах исследовательского класса. Измерение вибраций заявляется для Series 1585, а также для Flight Stand 15/50, где программное обеспечение поддерживает спектральный анализ (FFT) при повышенной частоте дискретизации; для DET G10/L10 указывается регистрация высокочастотной динамики, однако параметры виброканала в открытых данных не уточняются. Температурные измерения наиболее полно представлены в Flight Stand 15/50 (контактные датчики Pt100 и, в расширенных версиях, инфракрасный канал), тогда как для большинства остальных решений температурный контроль отсутствует или описан ограниченно.

Сводные характеристики стендов для диагностики ВМГ БПЛА

Таблица 2

| № | Страна | Модель                          | Частота вращения, RPM                                                 | Тяга (динамометрия), кгс                                                                             | Электрические данные (ток, A /напряжение, V)                                                                                                      | Макс. Момент, N·m                                                          | Ключевые плюсы/минусы                                                                                                                                                                                                            |
|---|--------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | КНР    | <b>LY-10 KGF Thrust Stand</b>   | Оптика по меткам: 0-150000; разрешение 1; точность 0.05%+0.05FS       | 0-10; шаг 1 г; точность 0.1%+0.1%FS                                                                  | I: 0-100 (разрешение 0.01; точность 0.1%+0.1%FS); U: 5-65 (разрешение 0.01; Точность 0.05%+0.05%FS)                                               | 5                                                                          | + Полный набор (тяга/момент/RPM/V/A), авто-тесты и CSV (ПО MET).<br>- Нет вибраций/температуры; 10 кгс может быть недостаточно для крупных систем.                                                                               |
| 2 | Канада | <b>Series 1585 Thrust Stand</b> | eRPM до 190000; оптика: до 30000 rpm;                                 | 0-5 кг; Точность: 0.5% ± 1 г                                                                         | I: 0-55 (±1%); U: 0-50 (±0.5%)                                                                                                                    | 2; Точность 0.5% ± 0.001                                                   | + Документированные допуски; измерение сопротивления обмоток, вибраций; частота силовых каналов до ~80 Гц.<br>- Не раскрыты детали АЦП; eRPM на низких оборотах требует проверки оптическим зондом.                              |
| 3 | Канада | <b>Flight Stand 15</b>          | Оптика до 30000 ±1 rpm                                                | 150 N (~15); Standard ±1.5; Точность Pro ±0.5% от измеренного; (Pro – калибровка по ASTM)            | I: 0-150 (разрешение 0.001; точность ±1% в зоне 5-150 A); U: 0-180 (разрешение 0.001; точность ±1%)<br>питание стенда: 90-260 V → 9 V 2 A         | 8; Точность: Standard ±0.1 N·m; Pro ±0.75%                                 | + Высокая динамика (до 1 кГц), широкий электро-диапазон (до 180 V, 150 A), датчики температуры, калибровка по ASTM (Pro).<br>- Метод измерения тока/напряжения не раскрыт; нет встроенного измерения сопротивления обмоток.      |
| 4 | Канада | <b>Flight Stand 50</b>          | Оптика 400-30000; Точность ±1.                                        | 500 N (~50); разрешение 0.2 N (Std) / 0.1 N (Pro); Точность: Standard ±5 N; Pro ±0.5% от измеренного | I: 0-300 (разрешение: 0.001; точность ±1% в зоне 15-300 A); U: 0-180 (разрешение 0.001; точность ±1% в зоне 5-180 V); питание: 90-260 V → 9 V 2 A | 30; разрешение 0.01 (Std)/0.005 (Pro); точность Std ±0.375 N·m; Pro ±0.75% | + Диапазоны для средних/тяжелых БПЛА (50 кгс, 30 N·m), дискретизация до 1 кГц, калибровка по ASTM (Pro), электро-каналы до 180 V/300 A.<br>- Метод тока/напряжения не раскрыт; высокая стоимость и требования к месту установки. |
| 5 | КНР    | <b>Mayatech MT10 PRO</b>        | Нет                                                                   | 0-10; Разрешение 0.01; Точность: 0.1%+0.1%FS                                                         | I: 0-150 (метод/точность не указаны); U: 7-60 (метод/точность не указаны); питание: 5-26 V                                                        | Нет                                                                        | + Компактность, низкая цена, пригоден для быстрых проверок.<br>- Ограниченная «прозрачность» электрических каналов, нет логирования на ПК.                                                                                       |
| 6 | КНР    | <b>WF-EN-17</b>                 | Оптика 0-15000; импульсный канал 0-60000; 0.05%+0.05FS; разрешение 1. | До 50; Разрешение 0.01; Точность 0.2%+0.2%FS                                                         | I: 0-200 (разрешение 0.01; точность 0.1%+0.1%FS); U: 5-65 (разрешение 0.01; точность 0.05%+0.05%FS); питание: 24 V                                | 50; Разрешение 0.01 N·m; 0.2%+0.2%FS                                       | + Поддержка ДВС/гибридов: ультразвуковое измерение расхода топлива (до 0.001 л/мин), широкие диапазоны момента и тяги, ПО и дистанционная связь.<br>- Нет вибраций/температуры.                                                  |

|    |        |                                                     |                                    |                                                                                    |                                                                                                    |     |                                                                                                                                                             |
|----|--------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7  | КНР    | <b>DET G10/L10</b>                                  | eRPM; диапазон/точность не указаны | G10 – 1; L10 – 3; точность не указана                                              | Ток: шунт + 24-бит АЦП (oversampling до 100 кГц); напряжение: 24-бит АЦП (oversampling до 100 кГц) | Нет | + Высокая частота записи, гибкое управление PWM, режимы сканирования. – Недостаток открытых метрологических данных по силовому каналу и тяге.               |
| 8  | Россия | <b>RThrust</b>                                      | Не изменяет                        | Тензодатчик до 5; погрешность до 1 г                                               | I: 30; Точность~0.1-0.2; U: до 4S; Разрешение до 0.01 V                                            | Нет | + Автоматическое пошаговое тестирование и графики эффективности.<br>– Нет RPM/момента/вибраций, ограниченные ток/напряжение.                                |
| 9  | Россия | <b>Avanti Education</b>                             | Да (данные не раскрыты)            | Тензометрический датчик (диапазон/точность не указаны)                             | I: 0-50; U: 8-26; питание от 220 V                                                                 | Нет | + Безопасность (кожух, аварийная кнопка), удобство, ориентирован на учебные задачи.<br>– Диапазоны и метрологические параметры /не раскрыты.                |
| 10 | КНР    | <b>Turnigy Thrust Stand (SKU 91070003 51-0)</b>     | Нет                                | До 5; шаг 1 г; точность ±10 г; метод: линейные подшпигники (тип датчика не указан) | Нет                                                                                                | Нет | + Простая настольная проверка до 5 кгс.<br>– Замечания к механике (возврат в ноль), нет электрических каналов и логирования.                                |
| 11 | КНР    | <b>Turnigy Thrust Stand &amp; Power Analyser v3</b> | Да (метод/диапазоны не раскрыты)   | До 5; шаг 1 г; точность ±10 г; тип датчика не указан                               | I: 100 (метод/точность не указаны); U: 0-60                                                        | Нет | + «Все в одном»: тяга + анализатор мощности + RPM/kv.<br>– Недостаточно данных о точности и частоте опроса, ограниченная пригодность для строгих измерений. |

Мобильное применение в большей степени характерно для компактных стендов экспресс-проверок (Mayatech MT10 PRO, линейка Turnigy), тогда как высокомошные измерительные комплексы обычно ориентированы на стационарную установку. Подключение к персональному компьютеру и экспорт данных, необходимые для воспроизводимых исследований, реализуются в LY-10 KGF, Series 1585, Flight Stand 15/50, WF-EN-17, DET G10/L10 и RThrust; для Mayatech и Turnigy компьютерная интеграция, как правило, не заявляется, что ограничивает их использование задачами оперативного подбора.

5. Какие различия стендов оказываются принципиальными в инженерной задаче.

5.1. Полнота измерительных каналов: «подбор» против «диагностики»

По Таблице 2 видно, что часть стендов ориентирована на быстрый подбор винта и двигателя (тяга + базовая электрика), тогда как инженерные комплексы добавляют измерение момента, вибраций и температуры. Для БПЛА это принципиально: одинаковая максимальная тяга при разных вибрациях или при разном тепловом режиме означает разный ресурс и разную устойчивость работы автопилота.

Практически полезный минимум для инженерного сравнения ВМГ – это тяга, ток, напряжение и обороты (RPM), причем с возможностью логирования. Однако для разработки (особенно при серийной эксплуатации) добавление момента, температуры и вибраций переводит испытания из фиксации интегральных характеристик в идентификацию механизмов.

5.2. Частота дискретизации и переходные процессы

В полете режимы работы постоянно меняются, поэтому мы интересуемся не только стационарной точкой «100% газа», но и:

время нарастания/спада тяги;

пики тока при резком изменении газа;

устойчивость оборотов на границах режимов.

Стенды с дискретизацией порядка сотен герц и выше (в ряде комплексов – до 1 кГц, а в отдельных системах регистрации – до нескольких кГц) позволяют увидеть динамику, которая полностью сглаживается при низкочастотной регистрации. Для диагностики ESC и оценки запаса по питанию это часто критичнее, чем «абсолютная точность» одной статической точки.

### 5.3. Вибрации и температура как критерии «готовности к эксплуатации»

Вибрации и температура при оценке винтомоторной группы выступают ключевыми критериями эксплуатационной готовности, поскольку именно они в наибольшей степени определяют ресурс и устойчивость работы силовой установки в реальных полетных режимах. Повышенный уровень вибраций, возникающий вследствие дисбаланса винта, дефектов подшипников, перекосов установки или резонансных явлений конструкции, приводит к ускоренному износу механических узлов и ухудшению качества функционирования бортовых измерительных систем и контуров управления, что прямо отражается на устойчивости и безопасности полета. Температурный режим двигателя и электронного регулятора скорости, в свою очередь, характеризует тепловую напряженность и запас по перегреву, определяя вероятность деградации магнитной системы, изоляции обмоток и силовых полупроводников при длительной работе под нагрузкой. Следовательно, стендовые измерения, включающие регистрацию вибраций (в том числе с возможностью спектрального анализа) и контроль температуры контактных либо бесконтактными средствами, позволяют перейти от оценки «тягово-энергетических» показателей к обоснованной диагностике надежности и применимости винтомоторной группы в условиях эксплуатации.

### 6. Заключение

Проведенный анализ показал, что современное развитие стендов для испытаний винтомоторных групп беспилотных летательных аппаратов связано с переходом от индикаторных измерений тяги к многофакторным измерительным комплексам, обеспечивающим синхронную регистрацию механических и электрических параметров. Установлено, что научная и инженерная ценность результатов определяется не предельными диапазонами, а метрологической состоятельностью измерений: применяемыми методами, заявленными погрешностями и разрешением, частотой дискретизации, процедурами обнуления и калибровки, а также воспроизводимостью условий эксперимента.

Для задач разработки и эксплуатации БПЛА принципиально важен переход от оценки преимущественно статических характеристик к диагностике ВМГ в динамике. Критическими параметрами, определяющими надежность и безопасность, являются переходные процессы (включая токовые пики и динамику тяги), вибрационный профиль, тепловые режимы двигателя и электронного регулятора скорости. Следовательно, при выборе стендового оборудования для научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы приоритет следует отдавать решениям с многоканальной синхронной записью, достаточной частотой опроса и контролем вибраций и температуры; в противном случае результаты испытаний останутся ограниченно сопоставимыми и недостаточными для обоснованных инженерных выводов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гу Пэнхао, В. Н. Рыльков, А. А. Лобатый Экспериментальное исследование вибраций винтомоторной группы агродрона // Наука и техника. 2023. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-vibratsiy-vintomotornoy-gruppy-agrodrona> (дата обращения: 02.03.2026).
2. Устинов М. А. Обзор существующих методов диагностирования электродвигателей // Форум молодых ученых. 2020. №5 (45). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-suschestvuyuschih-metodov-diagnostirovaniya-elektrodvigatelay> (дата обращения: 02.03.2026).
3. Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3 (часть 4) С. 419-423 URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14100> (дата обращения: 02.03.2026).
4. Коробейников Александр Борисович, Сарваров Анвар Сабулханович Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // ЭС и К. 2015. №1 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-metodov-diagnostirovaniya-elektrodvigatelay-i-perspektivy-ih-razvitiya> (дата обращения: 06.03.2026).
5. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин. Учебник для студ. высш. учебн. заведений/ О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская под ред. О.Д. Гольдберга. – М.:Издательский центр «Академия», 2010.– 288с. ISBN 978-5-7695-5739-2.
6. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика.

УДК 535.233.56, 536.5.081

*Дума<sup>1</sup> Э.Г.*

<sup>1</sup> Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

<sup>1</sup> era\_otd2@mil.ru

## **ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЦВЕТОВЫХ ОТТЕНКОВ НА ТЕРМОГРАММАХ В ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**Аннотация.** Представлена методика интерпретации цветовых оттенков термограмм в численные значения температуры, основанная на калибровке по встроенной градуировочной шкале. Использование алгоритма Mean Shift позволяет автоматизировать процесс и минимизировать влияние человеческого фактора.

Методика продемонстрировала высокую точность, обеспечивая среднее абсолютное расхождение до 0,8°C с данными термокамеры. Это делает ее эффективным инструментом для оценки состояния оборудования. Уникальным аспектом является способность объективно оценивать качество калибровки, что позволяет получать более надежные результаты диагностирования.

В работе подчеркивается универсальность методики, которая может быть адаптирована для различных термограмм, что делает ее пригодной для внедрения в автоматизированные системы контроля состояния оборудования в разных отраслях.

**Ключевые слова:** тепловизионный контроль, интерпретация термограмм, калибровка, непараметрическое оценивание, алгоритм Mean Shift, бесколлекторный двигатель, техническая диагностика

*Duma<sup>1</sup> E.G.*

<sup>1</sup> Military Innovation Technopolis "ERA", Anapa, Russia

<sup>1</sup> era\_otd2@mil.ru

## **INTERPRETATION OF COLOR SHADES ON THERMOGRAMS IN NUMERICAL TEMPERATURE VALUES**

**Abstract.** This work presents a methodology for interpreting color shades of thermograms into numerical temperature values, based on calibration through an embedded scale. The use of the Mean Shift algorithm enables the automation of the process and minimizes the influence of human factors.

The methodology demonstrated high accuracy, achieving an average absolute deviation of up to 0.8°C when compared with data from thermal cameras. This makes it an effective tool for assessing equipment condition. A unique aspect of the methodology is its ability to objectively evaluate calibration quality, thereby enhancing diagnostic reliability.

The work emphasizes the universality of the methodology, which can be adapted for various thermograms, making it suitable for implementation in automated monitoring systems across different industries.

**Keywords:** thermal imaging control, thermogram interpretation, calibration, nonparametric estimation, Mean Shift algorithm, brushless motor, technical diagnostics

Техническое диагностирование базируется на контроле и прогнозировании технического состояния, а также поиске мест и определении причин отказа (неисправности). Тепловизионный контроль позволяет бесконтактно получать тепловые поля объектов диагностирования без вмешательства в составные части с сохранением целостности, однако исходная форма представления данных – цветное изображение (термограмма) – требует субъективной визуальной интерпретации экспертом. Это вносит ошибки, вызванные человеческим фактором.

Применение автоматизированного перевода цветовых оттенков в численные значения температуры позволит снизить ошибки, вызванные человеческим фактором, следовательно переход от качественной цветовой шкалы к количественным значениям температуры является ключевой задачей, без решения которой невозможна объективная оценка технического состояния. Современные тепловизоры формируют стандартные растровые изображения (JPEG, PNG) со встроенной градуировочной шкалой, однако алгоритмические методы автоматического извлечения температурных данных из таких изображений разработаны недостаточно.

В качестве репрезентативного объекта для апробации выбран бесколлекторный двигатель (БКД) – ключевой элемент электромеханических систем, требующий надежных методов тепловизионного контроля.

**Целью работы** является разработка и верификация методики интерпретации цветовых оттенков термограмм в численные значения температуры. Для достижения этой цели необходимо разработать алгоритм калибровки термограммы по градуировочной шкале, основываясь на интерполяции в цветовом пространстве. Также важно адаптировать алгоритм кластеризации Mean Shift для анализа температурно-цветовых признаков. В конечном итоге планируется провести экспериментальную апробацию методики на тепловизионных данных бесколлекторного двигателя.

**Научная новизна** заключается в применении алгоритма Mean Shift для выделения доминирующего кластера с последующим получением статистических параметров на его основе.

### **Теоретические основы интерпретации термограмм**

Термограмма формируется в результате регистрации инфракрасного излучения объекта. Каждому значению температуры ставится в соответствие цвет согласно выбранной палитре. Для математического описания цвета используется пространство RGB, где цвет представляется вектором  $(R, G, B)$ . Для анализа распределения пикселей

в цветовом пространстве применяется непараметрическая оценка плотности. Пусть  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  – выборка наблюдений (например, векторов  $(R, G, B)$  имеющих неизвестную плотность распределения вероятности  $f(x)$  в этом пространстве. Оценка Парзена имеет вид [1]:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{j=1}^n K\left(\frac{x - x_j}{h}\right).$$

где  $K(\cdot)$  – ядерная функция (весовая функция),  $h > 0$  – параметр сглаживания (ширина окна). Как показано в статье [1], такая оценка является асимптотически несмещенной и состоятельной при выполнении условий  $h(n) \rightarrow 0$  и  $nh(n) \rightarrow \infty$  при  $n \rightarrow \infty$ . Этот подход не требует априорных предположений о виде распределения, что важно при анализе реальных цветовых гистограмм термограмм.

Для поиска мод (локальных максимумов) распределения используется алгоритм среднего сдвига (Mean Shift). Для множества точек  $\{x_i\}_{i=1}^n$  в пространстве признаков выборочное среднее (сдвинутая точка) определяется как [2]:

$$m(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)}.$$

Итеративное применение  $x \leftarrow m(x)$  заставляет точку двигаться в направлении градиента плотности к ближайшей моде. В статье [2] доказывается сходимость этого процесса. Важным свойством является то, что для гауссовых ядер средний сдвиг является градиентным отображением и обеспечивает эффективный поиск мод без явных искажений.

Для количественного описания распределения используются фундаментальные понятия теории вероятностей. Дисперсия характеризует разброс значений относительно математического ожидания. Для независимых испытаний дисперсия числа появлений события равна  $npq$ . Среднее квадратическое отклонение  $\sigma = \sqrt{D}$  имеет ту же размерность, что и случайная величина [3], что позволяет оценивать температурную неоднородность зоны.

## Методика интерпретации термограмм

### 2.1. Общая схема

Предлагаемая методика включает несколько ключевых этапов. На первом этапе осуществляется сегментация и калибровка, что подразумевает выделение градуировочной шкалы и построение функции  $T(R, G, B)$ . Далее следует преобразование, в ходе которого каждому пикселю присваивается значение температуры. Завершающий этап заключается в верификации калибровки, где применяется кластеризация Mean Shift для оценки полноты преобразования.

### 2.2. Калибровка по градуировочной шкале

Исходное изображение содержит вертикальную градуировочную шкалу с известным диапазоном температур (например, от 0 до 50°C). Процесс калибровки начинается с сегментации шкалы на  $N$  дискретных участков, где обычно используется  $\Delta T = T_{min} - T_{max}$ . Для каждого участка вычисляется средний вектор цвета  $c_i = (R_i, G_i, B_i)$ . Затем по надписям на шкале определяются соответствующие значения температуры  $T_i$ . Для произвольного пикселя с вектором  $c$  температура определяется методом кусочно-линейной интерполяции между двумя ближайшими опорными векторами  $c_i$  и  $c_{i+1}$  на основании евклидова расстояния в RGB-пространстве. Формула для вычисления температуры принимает вид:

$$T(c) = T_i + \frac{T_{i+1} - T_i}{\|c_{i+1} - c_i\|} \cdot \|c - c_i\|.$$

### 2.3. Верификация калибровки с помощью Mean Shift

Для контроля качества калибровки применяется алгоритм Mean Shift. В соответствии с теоремой [1], итеративный процесс сходится к локальным максимумам плотности распределения точек в пространстве признаков. Результаты кластеризации интерпретируются следующим образом: формирование единого доминирующего кластера, содержащего 99% и более пикселей зоны интереса, указывает на то, что все пиксели имеют схожие цветовые характеристики, а калибровочная функция адекватно описывает всю область, если же обнаруживается второй кластер с долей более 1%, это может свидетельствовать о наличии аномальной зоны, такой как локальный перегрев, или о систематической погрешности калибровки в данном диапазоне цветов. Центр доминирующего кластера  $c^*$  (мода распределения) пересчитывается в температуру  $T^* = T(c^*)$ , которая принимается за характерную температуру зоны. Согласно [1], выборочная мода является состоятельной оценкой моды генеральной совокупности.

### 2.4. Количественная оценка точности

Для численной оценки точности интерпретации используются несколько ключевых показателей. Полнота кластеризации, рассчитываемая как доля пикселей в доминирующем кластере ( $P_{dom} = N_{dom} / N_{total}$ ), указывает на эффективность выделения

значимой информации. Среднеквадратическое отклонение расстояний до центра кластера в RGB пространстве  $\sigma_{RGB}$ , характеризующее цветовую однородность зоны. Абсолютная погрешность  $\Delta = |T^* - T_{ref}|$ , где  $T_{ref}$  – значение, полученное контактным методом (термопара).

### **3. Экспериментальная апробация**

Объектом диагностики является БКД BrotherHobby Avenger 2816 750KV. Для оценки эффективности предложенной методики были использованы данные термокамеры, которая предоставляет значения температуры на уровень каждого пикселя, а не изображения.

Для каждой термограммы была проведена калибровка по градуировочной шкале. В процессе были использованы данные температуры, предоставленные термокамерой. Алгоритм Mean Shift с гауссовым ядром и параметром ширины окна  $h = 3$  применялся для выделения доминирующего кластера, на основе которого были рассчитаны цветовые моменты исследуемого участка.

Результаты сравнения показали, что значения температуры, полученные с использованием предложенной методики, имеют высокую точность. Среднее абсолютное расхождение между температурными данными термокамеры и модальной температурой, вычисленной методом, составило  $0,5^\circ\text{C}$ , максимальное расхождение –  $0,8^\circ\text{C}$ . Эти показатели указывают на высокую степень согласованности результатов методики с действительным техническим состоянием объекта, а также на получение значений цветовых моментов, на основе которых возможна дальнейшая оценка состояния объекта технического диагностирования.

### **4. Оценка методики**

Разработанная методика позволяет автоматически и с приемлемой точностью (ошибка менее  $1^\circ\text{C}$ ) преобразовывать цвет пикселей термограммы в значения температуры. В отличие от существующих подходов, требующих ручного снятия показаний или использования специализированного программного обеспечения, предложенный алгоритм полностью автоматизирует процесс калибровки по встроенной шкале.

Ключевым элементом новизны является применение алгоритма Mean Shift для объективной оценки качества калибровки. Показатель полноты кластеризации  $P_{dom}$  служит критерием, определяющим точность калибровочной функции в описании цветовых характеристик пикселей. Это минимизирует риск ложной интерпретации погрешностей калибровки и способствует более точной оценке состояния объекта.

Сравнительные данные с температурными измерениями, полученными термокамерой, подтверждают теоретические положения Парзена о состоятельности оценок моды и Ченга о сходимости процесса Mean Shift к модальным кластерам. Статистический анализ распределения пикселей в RGB-пространстве, основанный на понятиях дисперсии, позволяет количественно оценивать точность преобразования.

Методика является универсальной и может быть адаптирована для различных термограмм, содержащих градуировочную шкалу. Для ее эффективного применения в автоматизированных системах контроля требуется лишь предварительное выделение зон интереса на изображении.

### **Заключение**

В ходе исследования была разработана методика интерпретации цветовых оттенков термограмм в численные значения температуры, основанная на калибровке по встроенной градуировочной шкале. Методика включает использование алгоритма Mean Shift для объективной оценки качества калибровки.

Проведенный анализ показал, что разработанный подход позволяет достигать высоких результатов, обеспечивая среднюю абсолютную погрешность до  $0,8^\circ\text{C}$ . Автоматизация процесса преобразования цветовых значений в температуры минимизирует влияние человеческого фактора и снижает необходимость ручного снятия показаний.

Полученные результаты подтверждают универсальность методики, которая может быть адаптирована для различных термограмм.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode // The Annals of Mathematical Statistics. – 1962. – №3. – С. 1065–1076.
2. Cheng Y. Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1995. – №17. – С. 790–799.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 9-е изд. – Москва: Высшая школа, 2003. – 479 с.
4. Орлов А.И. Математика случая: Вероятность и статистика – основные факты. – Москва: МЗ-Пресс, 2004. – 110 с.



УДК 004.89:62-52

**Zhashkova<sup>1</sup> T.V., Pepel<sup>2</sup> L.N.M., Helal<sup>3</sup> S., Kuvshinova<sup>4</sup> E.V.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

<sup>4</sup> Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> tzhashkova@gmail.com

<sup>2</sup> nadiya.mix@gmail.com

<sup>3</sup> sonya.nina.helal@gmail.com

<sup>4</sup> kuvsinovae793@gmail.com

## DIGITAL TWINS IN NAVIGATION TASKS OF AUTONOMOUS OBJECTS

**Abstract.** This article examines the architectural and algorithmic aspects of integrating digital twins into the navigation of autonomous objects, including unmanned vehicles and robots. The study analyzes methods for eliminating drift in simultaneous localization and mapping algorithms, improving localization accuracy in environments where global navigation satellite systems are unavailable, and overcoming the sim-to-real gap. The experimental results are systematized: a 41% reduction in orientation error, complete drift elimination, and a physical-virtual synchronization accuracy of 0.061 m. The key challenges are identified, including synchronization, computational complexity, and cybersecurity, and promising research directions are proposed, including federated digital twins, cognitive digital twins, and autonomous creation of digital twins. It is shown that digital twins make it possible to solve fundamental navigation problems that are beyond the capabilities of traditional methods.

**Keywords:** digital twin, navigation of autonomous objects, SLAM, unmanned vehicles, machine learning, synchronization, reliability

**Жашкова<sup>1</sup> Т.В., Пепель<sup>2</sup> Л.Н.М., Хелал<sup>3</sup> С., Кувшинова<sup>4</sup> Е.В.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

<sup>4</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> tzhashkova@gmail.com

<sup>2</sup> nadiya.mix@gmail.com

<sup>3</sup> sonya.nina.helal@gmail.com

<sup>4</sup> kuvsinovae793@gmail.com

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В НАВИГАЦИОННЫХ ЗАДАЧАХ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** Рассматриваются архитектурные и алгоритмические аспекты интеграции цифровых двойников в навигацию автономных объектов, включая беспилотные транспортные средства и роботов. В исследовании анализируются методы устранения отклонений в алгоритмах одновременной локализации и картографирования, повышения точности локализации в условиях, когда глобальные навигационные спутниковые системы недоступны, и преодоления разрыва между симуляцией и реальностью. Систематизированы экспериментальные результаты: уменьшение ошибки ориентации на 41%, полное устранение дрейфа и точность физически-виртуальной синхронизации, равная 0,061 м. Определены ключевые проблемы, включая синхронизацию, вычислительную сложность и кибербезопасность, и предложены перспективные направления исследований, включая федеративные цифровые двойники, когнитивные цифровые двойники и автономное создание цифровых двойников. Показано, что цифровые двойники позволяют решать фундаментальные навигационные задачи, выходящие за рамки возможностей традиционного метода.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, навигация автономных объектов, SLAM, беспилотные транспортные средства, машинное обучение, синхронизация, надежность

Traditional navigation approaches, including GNSS- and IMU-based systems, have fundamental limitations. Signals from global navigation satellite systems are unavailable indoors, in tunnels, and in dense urban environments, often referred to as "urban canyons"; they may also be subject to jamming. Inertial systems, in turn, accumulate drift that grows unbounded over time. Alternative methods, such as visual and LiDAR odometry, as well as simultaneous localization and mapping (SLAM), provide high local accuracy but also suffer from drift over long-distance operation. In this context, digital twins (DTs) are considered a promising approach for significantly improving the reliability and accuracy of navigation.

The current state of research in this area can be summarized as follows. Sarker et al. [1] systematized approaches to digital-twin-assisted localization of intelligent vehicles and showed that using digital twins for LiDAR data registration reduces the root mean square orientation error by 41% compared with the conventional Normal Distributions Transform (NDT) method. Zgurovsky et al. [2] proposed a functional decomposition of digital twins for the navigation of mobile-agent swarms, including the swarm, environment, mission, telemetry, and individual-agent levels. This decomposition enables the computational load to be distributed between a ground control center and onboard systems, even under unstable communication conditions. Gu et al. [3] reviewed applications of

digital twins in intelligent transportation systems, including physical-virtual synchronization and security-related issues.

Studies focused on drift elimination in SLAM deserve particular attention. Merat, Cioffi, Bauersfeld, and Scaramuzza [4] proposed a method for aligning a sparse 3D point cloud generated by a visual-inertial system with a digital twin using point-to-plane matching without visual data association. Their results demonstrate complete drift elimination while maintaining real-time performance. Another approach, GBDTpose2, developed by Matiki et al. [5] and accepted for publication in 2025, relies on matching visual patterns between a physical structure and its digital twin using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm. Experiments in GPS-denied environments confirmed centimeter-level localization accuracy. Shahbaz [6] investigated the use of high-fidelity digital twins (HiFi DTs) to generate in-domain LiDAR datasets and showed that perception models trained on these synthetic data achieve performance comparable to, or even better than, models trained on real data. Yang et al. [7] presented a digital-twin-based method for autonomous navigation and control of omnidirectional mobile robots, covering four dimensions: physical space, virtual space, application services, and data processing. Their experiments confirmed a physical-virtual synchronization error of 0.061 m.

Before discussing the methods in detail, it is necessary to define the concept of a digital twin in the context of navigation. In this article, a digital twin is understood as a virtual model of a physical environment constructed from aerial photography, LiDAR scanning, and satellite imagery. Unlike static maps, a digital twin supports bidirectional synchronization: changes in the physical environment are promptly reflected in the model, while simulation results are used to control the autonomous object.

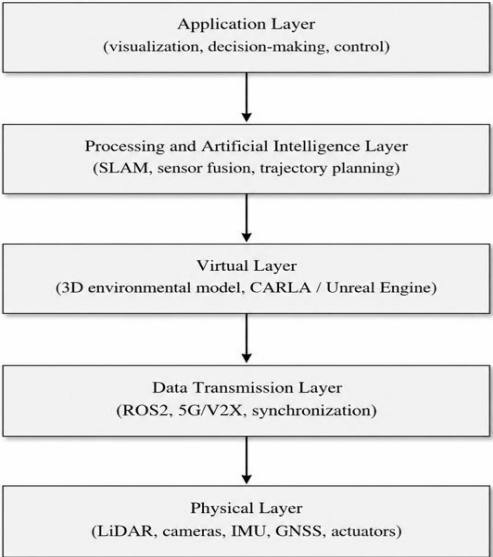


Figure 1 - Architecture of a digital-twin-based navigation system

A comparison of traditional navigation and digital-twin-based navigation is presented in Table 1.

Table 1

| Comparison of traditional navigation and digital-twin-based navigation |                                   |                                              |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|
| Characteristic                                                         | Traditional navigation (GNSS+IMU) | Digital-twin-based navigation                |
| Accuracy in GPS-denied environments                                    | Low or unavailable                | High (centimeter-level)                      |
| Consideration of dynamic environmental changes                         | Limited                           | Full, in real time                           |
| Onboard computational load                                             | High                              | Partially offloaded to the cloud             |
| Ability to predict future states                                       | Absent                            | Present (through simulation)                 |
| Communication requirements                                             | Low                               | High (synchronization with the digital twin) |

Figure 1 presents a generalized architecture of a digital-twin-based navigation system consisting of five layers: the physical layer, which includes onboard sensors such as LiDAR, cameras, IMU, and GNSS; the data transmission

layer, which supports synchronization and telemetry transfer via ROS2 and 5G/V2X; the virtual layer, represented by a 3D model of the environment in CARLA/Unreal Engine; the processing and artificial intelligence layer, which includes SLAM, sensor fusion, and trajectory planning using behavior trees; and the application layer, which provides visualization, decision-making, and control. The key component of this architecture is the digital twin interface module [2], which implements the “Learn-Simulate-Deploy-Adapt” cycle.

We now consider the key navigation methods that use digital twins. One of the fundamental problems of traditional navigation is the accumulation of error, or drift, in SLAM algorithms. Digital twins offer an effective solution to this problem. In the approach proposed by Merat et al. [4], a sparse 3D point cloud generated by VIO/VSLAM is aligned with a digital twin using point-to-plane matching without visual data association. This provides globally consistent localization with six degrees of freedom and robustness to changes in viewpoint. GBDTPose2 [5] uses ICP to estimate the relative pose and provides centimeter-level, drift-free accuracy, as confirmed in ROS. The approach proposed by Shahbaz [6], which uses high-fidelity digital twins to synthesize in-domain LiDAR datasets, addresses the sim-to-real gap: models trained on synthetic data achieve performance comparable to, or exceeding, that of models trained on real data. Another direction is the offloading of computations to the virtual environment [3]: computationally intensive trajectory planning and prediction are performed within the digital twin, while only control commands are transmitted to the physical object. This reduces onboard computational load and improves tracking accuracy in complex urban environments.

The application of digital twins varies considerably depending on the type of autonomous object. For mobile agents operating in GPS-denied environments, the Farsight Vision development presented at Commercial UAV Expo 2025 is relevant, as it converts aerial images and video into 2D/3D terrain models. GBDTPose2 [5] is aimed at drift-free localization, while multilevel digital twins [2] support decentralized swarm control even under disrupted communication conditions. For unmanned ground vehicles, the EDGAR platform developed by the Technical University of Munich [9] connects a physical vehicle to its one-to-one digital twin. The Russian startup Dioram [10] integrated SLAM-based visual navigation with a digital twin of Moscow roads, achieving accuracy of up to 10 cm without GPS. For ground mobile robots, the four-dimensional method proposed by Yang et al. [7] achieved a physical-virtual synchronization error of 0.061 m.

A comparison of the effectiveness of different navigation methods with and without digital twins is summarized in Table 2.

Comparison of the effectiveness of navigation methods with and without digital twins Table 2

| Method                                            | Type of error         | Without DT | With DT | Improvement                    |
|---------------------------------------------------|-----------------------|------------|---------|--------------------------------|
| LiDAR data registration (Sarker et al., 2025 [1]) | Orientation RMSE      | Baseline   | -41%    | Significant                    |
| VIO-GPS (Merat et al., 2024 [4])                  | Localization drift    | High       | Absent  | Complete elimination           |
| GBDTPose2 (Matiki et al., 2025 [5])               | Positioning error     | >1 m       | <0.1 m  | Order-of-magnitude improvement |
| DT-based OMR (Yang et al., 2025 [7])              | Synchronization error | >0.5 m     | 0.061 m | High                           |

Despite these impressive advances, the widespread adoption of digital twins faces a number of challenges. These include the need for real-time synchronization, since delays between the physical and virtual worlds require dedicated communication channels and edge computing; the high computational complexity of processing large volumes of 3D data, which can be partly addressed through heterogeneous computing using CPU/GPU/FPGA architectures; the problem of maintaining the relevance of the digital twin, which requires continuous model updates through IoT sensors; sim-to-real transfer, which, although mitigated by high-fidelity digital twins of sensors, is not fully eliminated; and, finally, issues related to the security and cybersecurity of synchronization channels. The main challenges and possible solutions are presented in Table 3.

Main challenges and possible solutions Table 3

| Challenge                  | Description                                    | Possible solution                                |
|----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Real-time synchronization  | Delays between the physical and virtual worlds | Dedicated communication channels, edge computing |
| Computational complexity   | Processing large volumes of 3D data            | Heterogeneous computing (CPU/GPU/FPGA)           |
| DT relevance               | Need for continuous model updates              | Automatic updates via IoT sensors                |
| Sim-to-real transfer       | Discrepancy between simulation and reality     | High-fidelity digital twins of sensors           |
| Security and cybersecurity | Vulnerability of synchronization channels      | Cryptographic protection, redundancy             |

Among the most promising directions for further development are federated digital twins, which involve combining several digital twins into a unified ecosystem with distributed control; integration with the metaverse, including the use of game-theoretic models for controlling connected and autonomous vehicles; autonomous creation of digital twins, in which mobile objects are used to automatically construct digital twins of unknown environments in real time; and cognitive digital twins, which integrate behavior trees and cognitive architectures to support more intelligent navigation control.

In conclusion, it should be emphasized that digital twins represent one of the most promising technologies for addressing fundamental navigation problems of autonomous objects. As recent studies show, the use of digital twins makes it possible to eliminate drift in SLAM algorithms, thereby ensuring globally consistent localization; to transfer computationally intensive planning tasks to the virtual environment, reducing the load on onboard systems; to bridge the gap between simulation and reality through high-fidelity digital models of sensors and the environment; and to ensure reliable navigation when signals from global navigation satellite systems are unavailable or suppressed. The reported results, including a 41% reduction in localization error, complete drift elimination, and centimeter-level accuracy, confirm the significant potential of digital twins. Further development of synchronization technologies, computing platforms, and artificial intelligence methods will open new opportunities for applying digital twins in the navigation of autonomous objects, bringing the era of fully autonomous transportation systems closer.

The article was prepared with the support of Russian Science Foundation grant № 25-21-00445, "Research and development of a mathematical framework for minimizing deviations in the positions of 3D models of reference objects synthesized by simulator systems of aviation training simulators when observed in multi-spectral mode."

## REFERENCES

1. Sarker M.A.L., Sarker M.O.F., Han D.S. A survey on digital twin assisted intelligent vehicle localization // ICT Express. 2025. Vol.11, №5. P.981-992.
2. Zgurovsky M., Pankratova N., Golinko I., Grishyn K. Digital twins in AI controlled navigation tasks for autonomous UAV swarm // Системні дослідження та інформаційні технології. 2025. №3. DOI: 10.20535/SRIT.2308 8893.2025.3.02.
3. Gu X., Duan W., Zhang G., Hou J., Peng L., Wen M., Gao F., Chen M., Ho P.H. Digital Twin Technology for Intelligent Vehicles and Transportation Systems: A Survey on Applications, Challenges and Future Directions // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2026. Vol.28. P.3235-3271. DOI: 10.1109/COMST.2025.3581152.
4. Merat R., Cioffi G., Bauersfeld L., Scaramuzza D. Drift Free Visual SLAM Using Digital Twins // IEEE Robotics and Automation Letters. 2025. Vol.10, №2. P.1633-1640. DOI: 10.1109/LRA.2024.3518840.
5. Matiki T., Narazaki Y., Chowdhary G., Spencer B.F. Digital Twin Approach for Drift Free UAV Localization in GPS Denied Environments // Journal of Computing in Civil Engineering. 2026. Vol. 40, № 1. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG 7010.
6. Shahbaz M. From Failure to Fidelity: Enabling Scalable Sim2Real LiDAR Perception Through Realistic Digital Twins. Doctoral dissertation, University of Central Florida, 2025. 189 p.
7. Yang H., Qin Z., Xia Y., Cheng F. Digital Twin Based Autonomous Navigation and Control of Omnidirectional Mobile Robots // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2025. Vol.74, №4. P.5687-5697. DOI: 10.1109/TVT.2024.3520991.
8. Farsight Vision. Система для разведки и автономных роботизированных решений. Commercial UAV Expo 2025, Лас Вегас.
9. Tahiraj I., et al. EDGAR: Excellent Driving Garching - A Digital Twin Framework for Autonomous Vehicle Research // Ouster Insights Blog. 2026. URL: <https://ouster.com/insights/blog/tum-bridging-sim-to-real-with-lidar>.
10. Dioram Visual Navigation integrates with Moscow Road digital twin // CNews. 2023. June 20. URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2023-06-20\\_dioram\\_visual\\_navigation](https://www.cnews.ru/news/top/2023-06-20_dioram_visual_navigation).
11. Юрков Н.К. Авионика беспилотных летательных аппаратов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2024. Т.1. С. 53-58.

УДК 621.3.019.34, 621.316.925.1

**Едиханов<sup>1</sup> А.К., Медведева<sup>2</sup> С.Н.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> azat.edihanov@yandex.ru

<sup>2</sup> sn-medvedeva@yandex.ru

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ОДНО- И ДВУХКОМПЛЕКТНОГО УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 кВ**

**Аннотация.** Производится расчет параметров надежности устройств релейной защиты и автоматики линии электропередачи 110 кВ, а также приводится сравнение однокомплектного и двухкомплектного устройств релейной защиты и автоматики.

**Ключевые слова:** устройство релейной защиты и автоматики, линия электропередачи, параметры надежности, интенсивность отказов, поток отказов, вероятность безотказной работы, вероятность отказа

**Edikhanov<sup>1</sup> A.K., Medvedeva<sup>2</sup> S.N.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> azat.edihanov@yandex.ru

<sup>2</sup> sn-medvedeva@yandex.ru

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF RELIABILITY OF ONE- AND TWO-SET RELAY PROTECTION AND AUTOMATION DEVICES FOR 110 KV POWER TRANSMISSION LINE**

**Abstract.** The paper calculates the reliability parameters of relay protection devices and automation of a 110 kV power transmission line, and also provides a comparison of one-set and two-set relay protection and automation devices.

**Keywords:** relay protection and automation device, power transmission line, reliability parameters, intensity failure, failure rate, probability of trouble-free operation, probability of failure

В современных электроэнергетических системах особое значение приобретает обеспечение высокой надежности функционирования устройств релейной защиты и автоматики, от корректной работы которых напрямую зависит устойчивость и безопасность энергосистемы. Линии электропередачи напряжением 110 кВ являются важным элементом распределительных и магистральных сетей, обеспечивая передачу электроэнергии на значительные расстояния и связывая ключевые узлы энергосистемы. В этих условиях требования к быстрдействию, селективности и надежности устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) существенно возрастают.

Одним из основных направлений повышения надежности функционирования защит является применение резервирования, в частности, переход от однокомплектных к двухкомплектным схемам построения устройств РЗА. Двухкомплектные системы, реализующие принцип функционального и структурного резервирования, позволяют существенно повысить вероятность безотказной работы защиты за счет дублирования основных элементов и независимости каналов функционирования.

В качестве объекта исследования представлена линия электропередачи (ЛЭП) напряжением 110 кВ, отходящая от транзитной понизительной подстанции 110/10 кВ. Устройства релейной защиты и сетевой автоматики (УРЗА) данной ЛЭП выполнены на микропроцессорной элементной базе, соединение УРЗА с вторичными цепями трансформаторов тока и напряжения осуществляется по контрольному кабелю. Схема подключения УРЗА представлена на рисунке 1.

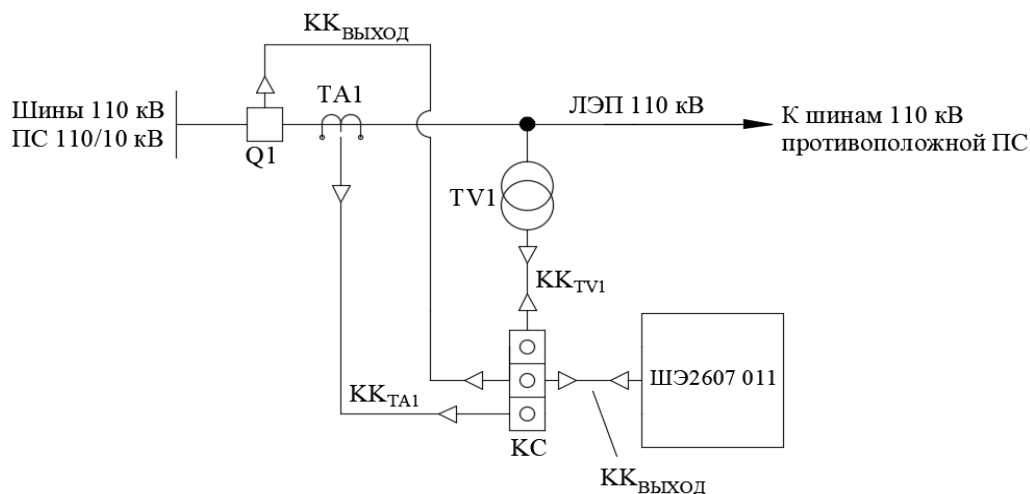


Рисунок 1 – Схема подключения однокомплектного УРЗА к ЛЭП 110 кВ

Поскольку в данной работе производится сравнительный анализ показателей надежности однокомплектного и двухкомплектного УРЗА, то на рисунке 1 и 2

показано два варианта подключения УРЗА к ЛЭП: в первом варианте для защиты ЛЭП используется шкаф защиты линии и автоматики управления линейным выключателем типа ШЭ2607 011, состоящий из одного комплекта резервных защит и автоматики управления выключателем, реализованным с помощью терминала БЭ2704; во втором варианте представлен шкаф типа ШЭ2607 011021, включающий в себя комплекты защит А1 и А2 на основе терминалов БЭ2704.

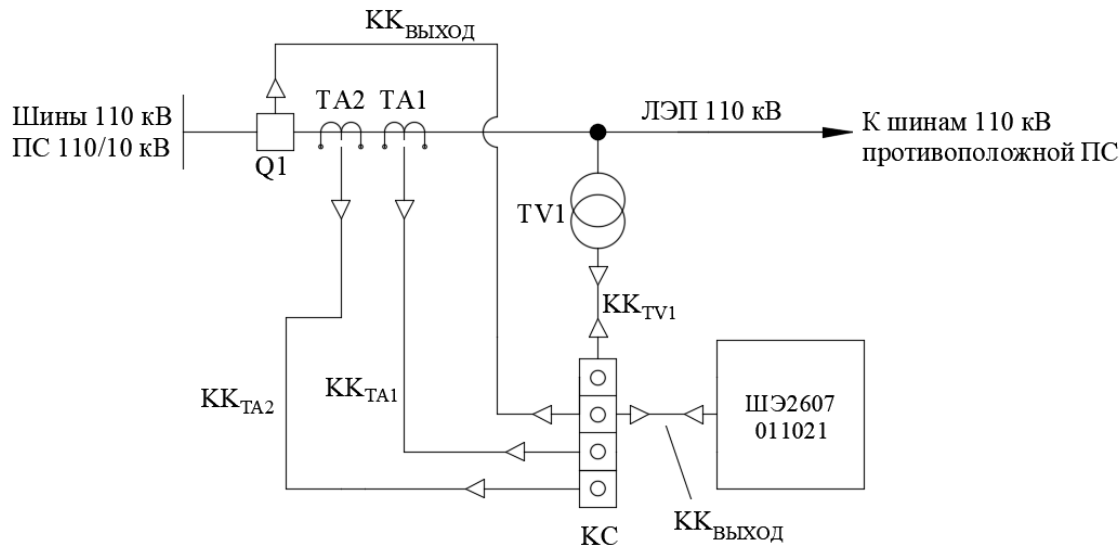


Рисунок 2 – Схема подключения двухкомплектного УРЗА к ЛЭП 110 кВ

Расчет показателей надежности УРЗА начинается с построения структурной схемы надежности (RBD), представляющей собой в данном случае графическое представление логической структуры, включающей в себя: трансформаторы тока (ТТ) ТА1, ТА2, трансформаторы напряжения (ТН) TV1, контрольные кабели (КК), связывающие ТТ/ТН и устройство РЗА между собой, само УРЗА (ШЭ2607 011 или ШЭ2607 011021), клемма соединений (КС), высоковольтный выключатель. На RBD они отображаются в виде отдельных составных частей/элементов, которые могут быть соединены последовательно/параллельно/смешанно. Отказ УРЗА может произойти по причине нарушения связи между «входом» и «выходом» [1, 2].

Исходные данные параметров надежности каждого элемента ЛЭП 110 кВ представлены в таблице 1.

Параметры надежности элементов ЛЭП 110 кВ

Таблица 1

| Элемент       | Средняя наработка до отказа, ч | Интенсивность отказов, 1/ч | Параметр потока отказов, 1/год | Среднее время восстановления, ч | Источник |
|---------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------|
| ТА1...ТА7     | 400000                         | $2,5 \cdot 10^{-6}$        | –                              | 50                              | [3]      |
| TV1, TV2      | 400000                         | $2,5 \cdot 10^{-6}$        | –                              | 50                              | [4]      |
| Q1, Q2        | –                              | –                          | 0,005                          | 40                              | [5]      |
| ШЭ2607 011    | 125000                         | $8 \cdot 10^{-6}$          | –                              | 2                               | [6]      |
| ШЭ2607 011021 | 125000                         | $8 \cdot 10^{-6}$          | –                              | 2                               | [6]      |
| КК            | 3170000                        | $0,315 \cdot 10^{-6}$ *    | –                              | 48                              | [7]      |
| КС            | –                              | $5 \cdot 10^{-9}$          | –                              | 48                              | [8]      |

\* – в 1/(км·ч)

Для расчета параметров надежности системы, представленной на рисунке 1, преобразуем ее к RBD-схеме, изображенной на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структурная схема надежности системы с однокомплектным УРЗА

Важным условием для корректного функционирования данного УРЗА является исправность вторичных цепей ТТ и ТН. При повреждении токовых цепей и/или цепей напряжения возникает возможность ложной работы/отказа в работе функций УРЗА (дистанционная защита, направленные ступени ТЗНП). По этой причине, элементы TV1, КК<sub>ТВ1</sub>, ТА1, КК<sub>ТА1</sub> на рисунке 3 соединены последовательно.

Для цепи ТА1 – КК<sub>ТА1</sub> расчет показателей надежности производится следующим образом:

Для ТА1 общую величину потока отказов принимается равным [9]:

$$\omega_{ТА1} = \lambda_{ТА1},$$

Вероятность вынужденного простоя ТА1 [9]:

$$q_{ТА1} = \frac{\omega_{ТА1} \cdot T_{В,ТА1}}{8760},$$

$$q_{ТА1} = \frac{2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{8760} = 1,25 \cdot 10^{-4}.$$

Общая величина потоков отказа КК [9]:

$$\omega_{КК,ТА1} = \omega_{КЛ1,ВЫХОД} = \lambda_{0,КК,ТА1} \cdot L_{КК,ТА1}, \quad \omega_{КК,ТА1} = 0,315 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 = 3,5 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч},$$

где  $L_{КК,ТА1}$  – длина КК, принимается равной 100 м,

$\lambda_{0,КК,ТА1}$  – интенсивность отказов 1 километра длины КК.

Вероятность вынужденного простоя КК определяется по следующему выражению [9]:

$$q_{КК,ТА1} = \omega_{КК,ТА1} \cdot T_{В,КК},$$

$$q_{КК,ТА1} = 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot 48 = 1,512 \cdot 10^{-6}.$$

Вероятность безотказной работы цепи ТА1 – КК<sub>ТА1</sub>:

$$p_{ТА1-КК,ТА1} = (1 - q_{ТА1}) \cdot (1 - q_{КК,ТА1}),$$

$$p_{ТА1-КК,ТА1} = (1 - 1,25 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 1,512 \cdot 10^{-6}) = 0,99987349,$$

или вероятность отказа данной цепи

$$q_{ТА1-КК,ТА1} = 1 - p_{ТА1-КК,ТА1} = 1,265 \cdot 10^{-4}.$$

Результаты расчетов цепей вторичной коммутации трансформаторов напряжения TV1 (цепь TV1 – КК<sub>TV1</sub>) аналогичны результатам расчетов для цепи ТА1 – КК<sub>ТА1</sub> и показатели надежности ТА1 и TV1 одинаковы (таблица 1).

Параметры надежности цепи последовательно соединенных ШЭ2607 011 – КК<sub>ВЫХОД</sub> – КС – Q1 определяются в соответствии с вычислениями, представленными выше. Вероятность безотказной работы и отказа всей системы соответственно равны:

$$p_{\text{сист}} = (1 - q_{TV1-КК,TV1}) \cdot (1 - q_{ТА1-КК,ТА1}) \cdot (1 - q_{ШЭ2607\ 011}) \times$$

$$\times (1 - q_{КК,ВЫХОД}) \cdot (1 - q_{КС}) \cdot (1 - q_{Q1}),$$

$$p_{\text{сист}} = (1 - 1,265 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 1,265 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 8 \cdot 10^{-5}) \times$$

$$\times (1 - 1,512 \cdot 10^{-6}) \cdot (1 - 2,74 \cdot 10^{-11}) \cdot (1 - 2,283 \cdot 10^{-5}) = 0,9996427,$$

$$q_{\text{сист}} = 1 - p_{\text{сист}} = 3,573 \cdot 10^{-4}.$$

Рассмотрим случай, при котором УРЗА оборудовано двумя комплектами защит (ШЭ2607 011021). RBD-схема данной защиты представлена на рисунке 4.

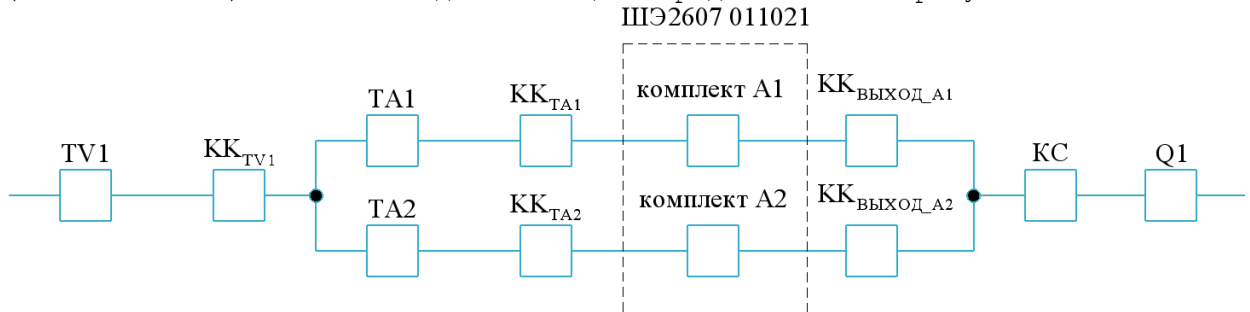


Рисунок 4 – Структурная схема надежности ШЭ2607 011021

Вероятности отказов:

комплектов А1 и А2:

$$q_{\text{комплект А1}} = q_{\text{комплект А2}} = q_{ШЭ2607\ 011} = 8 \cdot 10^{-5},$$

для цепи ТА1 – КК<sub>ТА1</sub> – комплект А1 – КК<sub>ВЫХОД\_А1</sub>:

$$p_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1} = (1 - q_{ТА1-КК,ТА1}) \cdot (1 - q_{\text{комплект А1}}) \cdot (1 - q_{КК,ВЫХОД_А1}),$$

$$p_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1} = (1 - 1,265 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 8 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 1,512 \cdot 10^{-6}) =$$

$$= 0,999792,$$

$$q_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1} = 1 - p_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1} = 2,08 \cdot 10^{-4},$$

для цепи ТА2 – КК<sub>ТА2</sub> – комплект А2 – КК<sub>ВЫХОД\_А2</sub>:

$$q_{ТА2,КК,ВЫХОД_А2} = q_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1} = 2,08 \cdot 10^{-4},$$

для параллельного соединения цепей ТА1 – КК<sub>ТА1</sub> – комплект А1 – КК<sub>ВЫХОД\_А1</sub> и ТА2 – КК<sub>ТА2</sub> – комплект А2 – КК<sub>ВЫХОД\_А2</sub>:

$$q_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1//ТА2,КК,ВЫХОД_А2} = q_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1} \cdot q_{ТА2,КК,ВЫХОД_А2},$$

$$q_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1//ТА2,КК,ВЫХОД_А2} = 2,08 \cdot 10^{-4} \cdot 2,08 \cdot 10^{-4} = 4,326 \cdot 10^{-8},$$

всей цепи (рис. 4):

$$p_{\text{сист}} = (1 - q_{TV1-КК,TV1}) \cdot (1 - q_{ТА1,КК,ВЫХОД_А1//ТА2,КК,ВЫХОД_А2}) \times$$

$$\begin{aligned} & \times (1 - q_{\text{КС}}) \cdot (1 - q_{Q1}), \\ p_{\text{сист}} &= (1 - 1,265 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 4,326 \cdot 10^{-8}) \cdot (1 - 2,74 \cdot 10^{-11}) \times \\ & \cdot (1 - 2,283 \cdot 10^{-5}) = 0,99985063, \\ q_{\text{сист}} &= 1 - p_{\text{сист}} = 1,494 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Таким образом, установка двухкомплектного УРЗА (ШЭ2607 011021) для защиты линий электропередачи 110 кВ уменьшает вероятность его отказа в 2,392 раза в сравнении с однокомплектным УРЗА (ШЭ2607 011).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурные схемы надежности (RBD) – URL: <https://pro-reliability.ru/rbd> (дата обращения 30.03.2026 г.)
2. Медведева С.Н., Кирилин В.Ю. Расчет показателей надежности автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов в распределительном устройстве 0,4 кВ // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения – 2024»): материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 6–7 ноября 2024 г.) / под ред. д-ра техн. наук, проф. Е. А. Печерской. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2024. – с.93–99.
3. Трансформаторы тока типа ТОГФ (П). Описание типа средства измерений – URL: <https://media.belgim.by/grsi/10252.pdf> (дата обращения 30.03.2026 г.)
4. Трансформаторы напряжения типа ЗНОГ. Описание типа средства измерений – URL: <https://media.belgim.by/grsi/10251.pdf> (дата обращения 30.03.2026 г.)
5. Реконструкция открытых распределительных устройств подстанций 110 кВ на основе применения вакуумных выключателей и компактных блочно-модульных конструкций – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rekonstruktsiya-otkrytyh-raspredelitelnyh-ustroystv-podstantsiy-110-kv-na-osnove-primeneniya-vakuumnyh-vyklyuchateley-i-kompaktnyh> (дата обращения 30.03.2026 г.)
6. Шкаф защиты линии и автоматики управления линейным (обходным) выключателем ШЭ2607 011(011011) – URL: [https://ekra.ru/upload/iblock/4ed/%D0%A0%D0%AD%20%D0%A8%D0%AD2607%20011\\_400.pdf](https://ekra.ru/upload/iblock/4ed/%D0%A0%D0%AD%20%D0%A8%D0%AD2607%20011_400.pdf) (дата обращения 30.03.2026 г.)
7. Повышение качества функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций – URL: [https://omgtu.ru/scientific\\_activities/dissertatsionnye\\_sovety/obyavleniya\\_o\\_zashchite\\_dissertatsiy\\_i\\_dokumenty\\_k\\_nim/Simakov/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%D0%A1%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%90.%D0%92..pdf](https://omgtu.ru/scientific_activities/dissertatsionnye_sovety/obyavleniya_o_zashchite_dissertatsiy_i_dokumenty_k_nim/Simakov/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A1%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%90.%D0%92..pdf) (дата обращения 30.03.2026 г.)
8. Разработка методов управления эксплуатацией релейной защиты – URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/104681> (дата обращения 30.03.2026 г.)
9. Медведева С.Н., Кирилин В.Ю. Сравнение схем электроснабжения по параметрам надежности // Инжиниринг и технологии, т.9, №2, 2024. С.79–83.



УДК 621.3.052.62

**Девяткин<sup>1</sup> Н.А., Медведева<sup>2</sup> С.Н.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> gidrrafofen@mail.ru

<sup>2</sup> sn-medvedeva@yandex.ru

### **СТРУКТУРА ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ЭНЕРГОРАЙОНА С РАЗВИТЫМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ**

**Аннотация.** Рассматривается вопрос выбора структуры генерирующих мощностей энергорайона с высокой долей возобновляемых источников энергии. Учитываются технологии накопления энергии и программы управления спросом (Demand Response, DR) как ключевые инструменты повышения надёжности и экономичности энергосистем. Представляется методика выбора структуры с учётом российских реалий, и предлагаются рекомендации по практической реализации.

**Ключевые слова:** структура энергосистемы, возобновляемые источники энергии, системы накопления энергии, управление спросом, надёжность

**Devyatkin<sup>1</sup> N.A., Medvedeva<sup>2</sup> S.N.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> gidrrafofen@mail.ru

<sup>2</sup> sn-medvedeva@yandex.ru

### **THE STRUCTURE OF GENERATING CAPACITIES OF AN ENERGY REGION WITH DEVELOPED RENEWABLE ENERGY SOURCES BASED ON THE USE OF ENERGY STORAGE SYSTEMS AND DEMAND RESPONSE PROGRAMS**

**Abstract.** This article examines the selection of a generating capacity structure for a power district with a high share of renewable energy sources. Energy storage technologies and demand response (DR) programs are considered as key tools for improving the reliability and efficiency of power systems. A methodology for selecting a structure, taking into account Russian realities, is presented, and recommendations for practical implementation are offered.

**Keywords:** power system structure, renewable energy sources, energy storage systems, demand response, reliability

Рост доли ВИЭ в структуре электроэнергетики приводит к необходимости поиска новых решений по обеспечению надёжности и баланса энергосистем. ВИЭ, как правило, характеризуются непостоянной выработкой, что создаёт угрозу дефицита мощности в пиковые часы и требует дополнительной гибкости энергосистемы [1].

В российском контексте развитие ВИЭ стимулируется государственными программами [2, 3], однако остаётся проблема интеграции таких источников в существующую энергетическую инфраструктуру [1]. Одним из решений является внедрение систем накопления энергии (СНЭ) [4], а также использование программ управления спросом [5], позволяющих гибко реагировать на изменения нагрузки.

При построении модели оптимизации используются следующие исходные параметры: почасовой профиль потребления электроэнергии; географически обусловленный потенциал ВИЭ (солнечной, ветровой, биомассы); стоимость строительства и эксплуатации генерирующих объектов [6]; характеристики систем накопления (мощность, энергоёмкость, КПД, срок службы) [4];

потенциал программ управления спросом в бытовом и промышленном секторах [5]; ограничения сетевой инфраструктуры и резервирования [6].

Целевая функция направлена на минимизацию суммарных приведённых затрат на строительство, эксплуатацию, резервирование и интеграцию систем, при обеспечении надёжности электроснабжения и устойчивости к колебаниям ВИЭ [6].

Ограничения включают: баланс спроса и предложения в каждый час; технические ограничения генераторов, накопителей и DR-систем; минимальные и максимальные уровни мощности; уровень надёжности энергоснабжения [6].

Применяется смешанное целочисленное линейное программирование (MILP) с помесчанным или почасовым временным разрешением. В модель включаются: переменные генерации по типам источников; переменные заряд/разряд накопителей; переменные по объёму участия потребителей в DR; стохастические параметры генерации ВИЭ на основе исторических данных [6].

Модель энергосистемы с ВИЭ представлена на рисунке.

Анализ показал, что наиболее эффективной, т.е. сбалансированной структурой с минимальными затратами является комбинированная структура, в которой наряду с ВИЭ используются и системы накопления, и программы управления спросом [6].

В то же время в России имеются свои особенности и вызовы, а именно:

климатические особенности, которые снижают эффективность солнечной и ветровой генерации в большинстве регионов России, например, в Пензенской области число облачных дней составляет около 90 дней в году, а это около четверти года. Для

ветровой генерации необходима скорость ветра более 3 м/с, а в Пензенской области на высоте 10 м такой ветер бывает около 90 дней [7];

изолированные и удалённые районы наиболее перспективны для применения ВИЭ + СНЭ, т.к. они требуют высокую стоимость доставки топлива, и если туда проложены линии электропередачи, то они имеют низкую надёжность электроснабжения [4];

отсутствие рыночных стимулов к DR: требуется развитие нормативной базы и пилотных проектов [5];

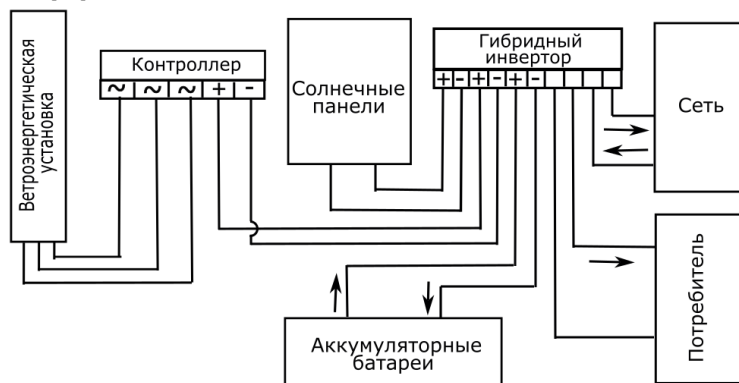


Рисунок – Модель энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии

Проведён анализ четырёх сценариев развития энергосистемы:

| Сценарий           | ВИЭ  | СНЭ | DR  | Итог                                                                  |
|--------------------|------|-----|-----|-----------------------------------------------------------------------|
| 1. Базовый         | Есть | Нет | Нет | Высокая доля резервной теплогенерации, повышенные затраты             |
| 2. С накоплением   | Есть | Да  | Нет | Сглажены пики и провалы, снижена зависимость от ископаемых источников |
| 3. С DR            | Есть | Нет | Да  | Частичное снижение пиков, но остаются риски дефицита                  |
| 4. Комбинированный | Есть | Да  | Да  | Наиболее сбалансированная структура, минимальные суммарные затраты    |

недостаточная развитость систем накопления, вызванная малым количеством реализованных объектов, высокой стоимостью таких систем, например, стоимость аккумулятора литий-полимерного (Li-Pol) 52030 мм составляет 462,24 руб, а его номинальная емкость 250 мАч [8], а также отсутствием опыта эксплуатации в промышленных масштабах [4].

Поэтому предлагается: Стимулировать развитие гибридных систем ВИЭ + СНЭ в изолированных регионах [4]. Разработать нормативную базу и финансирование для участия потребителей в программах DR [5]. Использовать оптимизационные модели на этапе планирования региональных схем и программ развития энергетики [6]. Создать условия для привлечения инвестиций в строительство накопительных мощностей [3]. Расширить государственные программы по ДПМ (договоры предоставления мощности) на проекты, включающие накопители и DR-компоненты [3].

**Выводы:** Оптимизация структуры генерации с учётом ВИЭ, накопителей и программ управления спросом представляет собой комплексный подход, позволяющий повысить устойчивость и эффективность энергосистем. В условиях России особенно важно адаптировать такие подходы к специфике территорий, климатических условий и текущей инфраструктуры. Развитие этих направлений требует системного подхода, включающего технологическую, экономическую и регуляторную составляющие.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов А.А., Ушаков С.А. Проблемы интеграции ВИЭ в энергосистему России // Электроэнергетика. – 2023. – №4. – С. 12-18.
2. Институт энергетических исследований РАН. Энергетическая стратегия России до 2035 года. – М., 2020. – eriras.ru
3. Официальный сайт Минэнерго РФ. – minenergo.gov.ru (дата обращения 12.10.2025 г.)
4. Скачков И.М., Васильев П.Ю. Системы накопления энергии в энергетике: возможности и ограничения // Электричество. – 2022. – №5. – С. 33-40.
5. Михайлов А.С. Управление спросом на электроэнергию: российская и зарубежная практика // Энергетическая политика. – 2021. – №3. – С. 27-35.
6. Чеботарёв А.П., Жданов П.В. Модели оптимизации структуры генерации в регионах с ВИЭ // Вестник МЭИ. – 2023. – №7. – С. 45-54.
7. Бережкова Д.В., Медведева С.Н. К вопросу надежности элементов альтернативной энергетики // Инжиниринг и технологии. – 2022. – т.7.
8. Сайт Группы компаний Промэлектроника – <https://www.promelec.ru/product/338846> (дата обращения 12.10.2025 г.).

УДК 621.3.087.92

**Китаев<sup>1</sup> А.С., Ильин<sup>2</sup> К.А., Баранов<sup>3</sup> В.А.**

<sup>1,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

<sup>1</sup> a.kitaev@ntech58.ru

<sup>2</sup> kirik3271nikita99@yandex.ru

<sup>3</sup> baranov\_va2202@mail.ru

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА ИМИТАЦИИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНХРОННОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

**Аннотация.** Рассматривается определение метрологических характеристик цифрового стенда на базе отладочной платы STM32 NUCLEO-H743ZI и ПЛИС ALTERA EP1K30TC144-3 для исследования динамических характеристик синхронного аналого-цифрового преобразования при функционировании в режиме имитации преобразования синусоидального напряжения. Реализован режим имитации формирования выходного кода 3-разрядного синхронного АЦП для синусоидального напряжения с размахом 8 В и частотой 1 кГц. Экспериментально определено, что при частоте дискретизации 32,01 кГц погрешность формирования частоты цифрового сигнала, имитирующего синусоидальное напряжение, составляет 0,03%. Тем самым подтверждена возможность использования стенда для определения времени преобразования кодов цифровым блоком синхронного АЦП до 7 двоичных разрядов при синусоидальном входном напряжении до 1 кГц.

**Ключевые слова:** синхронный аналого-цифровой преобразователь, программируемая логическая интегральная схема, микроконтроллер STM32, измерение времени аналого-цифрового преобразования

**Kitaev<sup>1</sup> A.S., Ilyin<sup>2</sup> K.A., Baranov<sup>3</sup> V.A.**

<sup>1,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Rubin Research and Production Enterprise, Penza, Russia

<sup>1</sup> a.kitaev@ntech58.ru

<sup>2</sup> kirik3271nikita99@yandex.ru

<sup>3</sup> baranov\_va2202@mail.ru

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE SIMULATION MODE OF THE SINUSOIDAL INPUT VOLTAGE OF THE SYNCHRONOUS ADC TEST STAND**

**Abstract.** This article discusses the determination of the metrological characteristics of a digital bench based on the STM32 NUCLEO-H743ZI development board and the ALTERA EP1K30TC144-3 FPGA for studying the dynamic characteristics of synchronous analog-to-digital conversion when operating in the mode of simulating the conversion of a sinusoidal voltage. The article implements the mode of simulating the generation of the output code of a 3-bit synchronous ADC for a sinusoidal voltage with a range of 8V and a frequency of 1kHz. It has been experimentally determined that at a sampling frequency of 32.01 kHz, the error in generating a digital signal that mimics a sinusoidal voltage is 0.03%. This confirms the possibility of using the bench to determine the conversion time of codes by a synchronous ADC digital block up to 7 binary digits with a sinusoidal input voltage up to 1 kHz.

**Keywords:** synchronous analog-to-digital converter, programmable logic integrated circuit, STM32 microcontroller, analog-to-digital conversion time measurement

### **Введение**

В быстродействующих аналого-цифровых преобразователях (АЦП) на быстродействие значительно влияет не только процесс формирования первичного кода, но и последующая его цифровая обработка для формирования результата преобразования. Для АЦП, реализующего синхронный способ аналого-цифрового преобразования [1], выходной код имеет нестандартную структуру и включает номер события, которым считается момент равенства аналогового напряжения одному из группы опорных уровней, номер уровня опорного напряжения, которому равно аналоговое напряжение при этом событии, и число периодов опорной частоты между соседними событиями. Такой алгоритм аналого-цифрового преобразования позволяет минимизировать потери информации о форме преобразуемого сигнала до половины кванта АЦП по амплитуде и периода опорной частоты по времени. Однако при этом возникает задача преобразования первичного кода в стандартный.

Время преобразования первичного кода в стандартный, в значительной степени определяющее общее время аналого-цифрового преобразования, существенно зависит от формы преобразуемого напряжения. В связи с этим необходимо обеспечить возможность имитации формирования первичного кода синхронного АЦП при подаче на вход напряжения одной из типовых форм: синус, меандр, треугольник, пила и др. Наиболее часто востребовано синусоидальное напряжение, поскольку он широко применяется при решении различных измерительных задач, в частности, для измерений параметров диэлектрических [2] и других параметрических датчиков методом импедансной спектроскопии [3].

Целью работы являлась реализация и экспериментальная проверка на цифровом стенде режима генерации цифрового кода, имитирующего выходной код 3-битного синхронного АЦП, при преобразовании синусоидального сигнала частотой 1 кГц.

Стенд для исследования синхронного АЦП

Стенд для исследования синхронного АЦП состоит из следующих основных компонентов:

отладочная плата STM32 NUCLEO-H743ZI на базе микроконтроллера **STM32H743ZI**;  
программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) ALTERA EP1K30TC144-3;  
преобразователь кодов UART-USB CH343;  
персональный компьютер с программой регистрации и анализа данных.

ПЛИС работает от внешнего генератора частотой 40 МГц, что соответствует тактовому периоду 25 нс. При изменении состояния входов ПЛИС записывает в FIFO текущее состояние входов и значение 24-битного счётчика времени. Один пакет данных содержит 5 байт: статус, состояние входов и три байта времени. Первый байт может принимать значения 0x54, 0x55, 0x56 и 0x57, отражающие состояние FIFO. Для режима высокой скорости использовалась передача данных со скоростью 6 Мбит/с. При такой скорости время передачи одного пакета из пяти байт составляет 8,33 мкс.

В качестве тестового сигнала выбран синусоидальный сигнал частотой 1 кГц. Разрядность имитируемого АЦП составляет 3 бита, то есть диапазон изменения аналогового 8 В делится на кванты размером 1В опорными уровнями 1 В, 2 В, 3 В, 4 В, 5 В, 6 В, 7 В, 8 В.

Для формирования сигнала использовалась таблица отсчётов на 32 значения за один период. С учётом того, что временной шаг счётчика ПЛИС составляет 25 нс, ожидаемый интервал между соседними отсчётами составил  $31,25 \text{ мкс} / 25 \text{ нс} = 1250$  тактов.

Для формирования отсчётов использовался таймер TIM2 микроконтроллера STM32. Код АЦП передавался по линиям PA0-PA2. Дополнительно используется линия PA3 в качестве строба, необходимого для фиксации каждого отсчёта ПЛИС в том случае, если два соседних значения кода совпадают.

Назначение линий:

| Линия STM32 | Назначение     |
|-------------|----------------|
| PA0         | бит 0 кода АЦП |
| PA1         | бит 1 кода АЦП |
| PA2         | бит 2 кода АЦП |
| PA3         | строб отсчёта  |
| GND         | общая земля    |

Таблица отсчётов 3-битного синуса имеет вид:

4, 5, 5, 6, 6, 7, 7, 7,  
7, 7, 6, 6, 5, 5, 4, 4,  
4, 3, 3, 2, 2, 1, 1, 1,  
1, 1, 2, 2, 3, 3, 4, 4.

Таким образом, микроконтроллер формирует цифровую последовательность, соответствующую выходу 3-битного АЦП при подаче на его вход синусоидального сигнала с размахом 8В и частотой 1кГц. При обработке данных учитывались только штатные состояния FIFO, соответствующие статусам 0x54 и 0x55. Состояния 0x56 и 0x57 использовались для контроля перегрузки буфера. В данном эксперименте переполнения FIFO обнаружено не было.

Результаты эксперимента

В ходе эксперимента получены следующие результаты:

| Параметр                            | Значение      |
|-------------------------------------|---------------|
| Число строк измерений               | 9431          |
| Количество строк основного кластера | 9012          |
| Средний интервал между отсчётами    | 1249,6 такта  |
| Средний интервал между отсчётами    | 31,239882 мкс |
| Частота дискретизации               | 32010,364 Гц  |
| Частота синусоидального сигнала     | 1000,324 Гц   |
| Статус 0x54                         | 9012          |
| Статус 0x55                         | 419           |
| Статус 0x56                         | 0             |
| Статус 0x57                         | 0             |

Средний интервал между отсчётами составил 1249,6 такта. В пересчёте во временную область длительность интервала составила  $1249,595 \times 25 \text{ нс} = 31,239 \text{ мкс}$ . По этому значению была рассчитана частота дискретизации, которая составила  $F_s \approx 32010,364 \text{ Гц}$ . Так как один период синуса содержит 32 отсчёта, частота синусоидального сигнала составила  $F \approx 32010,364 / 32 \approx 1000,324 \text{ Гц}$ . Таким образом, погрешность формирования частоты цифровой синусоиды не превышает 0,03%. Отсутствие статусов 0x56 и 0x57 показывает, что FIFO ПЛИС не находился в состоянии переполнения. Следовательно, регистрация событий происходила без потери данных.

Заключение

Реализован и экспериментально проверен режим имитации цифрового выхода 3-битного синхронного АЦП для синусоидального сигнала с размахом 8 В и частотой 1 кГц. Генерация выполняется микроконтроллером STM32H743ZI с использованием таймера TIM2. Экспериментально установлено, что при частоте дискретизации 32,01 кГц, погрешность формирования частоты цифровой синусоиды не превышает 0,03% и является ничтожно малой по сравнению с погрешностью квантования синхронных АЦП с числом двоичных разрядов не более 7 (0,08%).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2835033 С1 Российская Федерация, МПК H03M 1/36. Способ аналого-цифрового преобразования напряжения / Кузьмин А. В., Ильин К. А., Кузнецова О. Ю., Пушкарёва А. В., Баранов В. А.; заявл. 13.08.2024; опубл. 21.02.2025, Бюл. № 6.
2. Баранов, В. А. Амбулаторный мониторинг внешнего дыхания дизелькометрическим методом / В. А. Баранов, А. И. Фролова, М. В. Бержинская // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2023. – Т. 1. – С. 427-429.
3. Исследование дизелькометрических датчиков устройства для амбулаторного мониторинга внешнего дыхания / А. И. Фролова, В. А. Баранов, О. В. Карпанин, Буренин К.Р., Чихрина У.С. // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2024. – Т. 2. – С. 286-289.
4. Генератор кодов для отладки программного обеспечения аналого-цифрового преобразователя / К. Р. Буренин, А. С. Китаев, К. А. Ильин, В. А. Баранов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шлядинские чтения – 2025"): Материалы XVII Международной научно-технической конференции, Пенза, 06-07 ноября 2025 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2025. – С. 276-279.
5. STM32H743 Reference Manual. STMicroelectronics, 2023. URL: [https://www.st.com/resource/en/technical\\_note/tn1433-reference-device-marking-schematics-for-stm32-microcontrollers-and-microprocessors-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/technical_note/tn1433-reference-device-marking-schematics-for-stm32-microcontrollers-and-microprocessors-stmicroelectronics.pdf) (дата обращения: 10.03.2026)
6. Intel (Altera). EP1K30TC144-3 FPGA Datasheet. Intel FPGA, 2024. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/509378/ALTERA/EP1K30TC144-3N.html> (дата обращения: 10.03.2026).

УДК 629.5.062

**Сорокин<sup>1</sup> И.В., Белоусов<sup>2</sup> И.В., Самосейко<sup>3</sup> В.Ф., Саушев<sup>4</sup> А.В.**

<sup>1,2,3,4</sup> Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> ideo@list.ru

<sup>2</sup> ibel@bk.ru

<sup>3</sup> samoseyko@mail.ru

<sup>4</sup> saushev@bk.ru

## **МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ В ГРЕБНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА**

**Аннотация.** Рассмотрены способы идентификации ледовой нагрузки при применении в качестве гребного электродвигателя синхронной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Ледовая нагрузка оценивается на основе уравнения вращательного тела при учете, что известно достаточное количество гармонических составляющих токов и угла вращения. Гармонические составляющие в анализируемых уравнениях представлены функциями угла поворота ротора, что позволяет удобнее производить быстрое преобразование Фурье и сравнивать полученные зависимости с аналогичными, используемыми в нормативной и научной документации.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, синхронный электродвигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора, гребной электропривод, электрическая машина, ледовая нагрузка

**Sorokin<sup>1</sup> I.V., Belousov<sup>2</sup> I.V., Samoseyko<sup>3</sup> V.F., Saushev<sup>4</sup> A.V.**

<sup>1,2,3,4</sup> Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

<sup>1</sup> ideo@list.ru

<sup>2</sup> ibel@bk.ru

<sup>3</sup> samoseyko@mail.ru

<sup>4</sup> saushev@bk.ru

## **METHOD OF IDENTIFYING PULSATIONS OF THE RESISTANCE MOMENT IN A ROWING ELECTRIC DRIVE WITH ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF THE ROTOR**

**Abstract.** The article discusses methods for identifying the ice load when using a synchronous electric machine with anisotropic magnetic rotor conductivity as a propulsion electric motor. The ice load is estimated based on the equation of a rotating body, assuming that a sufficient number of harmonic components of currents and rotation angles are known. The harmonic components in the analyzed equations are represented as functions of the rotor angle, which makes it easier to perform fast Fourier transforms and compare the resulting dependencies with similar ones used in regulatory and scientific documentation.

**Keywords:** higher harmonics, synchronous electric motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor, propulsion electric drive, electric machine, ice load

**Введение.** При эксплуатации судов ледового класса важной задачей является увеличение срока службы механических частей гребной электрической установки (ГЭУ) – элементов валопровода, подшипниковых узлов, муфт и. т. п.

Особенностью воздействия ледовой нагрузки является то обстоятельство, что динамический момент на валу испытывает значительные колебания [1–4]. Это приводит не только к снижению срока службы механических частей, но и к снижению точности поддержания частоты вращения и мощности потребляемой электроприводом ГЭУ. В связи с этим актуальной задачей является измерение или идентификация момента ледовой нагрузки с целью ее дальнейшей компенсации средствами управления. В качестве приводного электродвигателя принимается синхронный двигатель с анизотропной магнитной проницаемостью ротора (СДАМПР) о перспективности, использования которых в ГЭУ указано в работах [5, 7–9].

**Методы и материалы.** В режиме фрезеровки льда к нагрузке на винте, создаваемой силой сопротивления воды, добавляется активная реакция винта на столкновения с кусками льда [1, 4]. При этом возникающий момент сопротивления сильно зависит от толщины льда, числа лопастей винта и частоты вращения, что широко отражено в правилах и рекомендациях по проектированию судов ледового класса [1]. В источниках [2, 4] момент сопротивления ледовой нагрузке представляется как функция угла поворота винта. Однако, существуют источники, иллюстрирующие ледовую нагрузку в реальном времени [3]. Анализ данных материалов позволяет сделать вывод, что нагрузка  $Q_{\text{лед}}$ , вызываемая сопротивлением одной лопасти при касании льда, может быть описана как функция угла поворота через выражение

$$Q_{\text{лед}}(\gamma) = C_q \cdot Q_{\text{MAX}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\alpha} \cdot \gamma\right), \quad (1)$$

где  $Q_{\text{MAX}}$  – максимальное значение ледовой нагрузки;  $\alpha$ ,  $C_q$  – коэффициенты зависящий от типа ледовой нагрузки.

Тогда ледовую нагрузку можно представить, как последовательные одиночные воздействия (1) со сдвигом, зависящим от числа лопастей. Пример формы и характера ледовой нагрузки для различного числа лопастей приведены на Рис 1 [3].

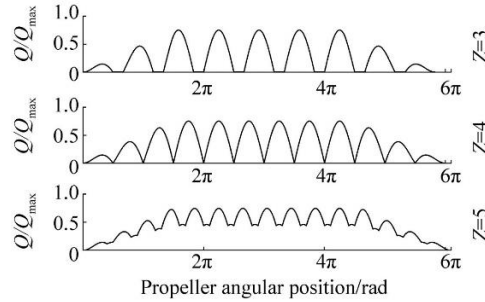


Рисунок 1 - Схема гребной установки ледокольного судна

Для идентификации гармонических составляющих момента сопротивления необходимо воспользоваться основным уравнением вращательного движения при учете неподвижности оси вращения и постоянства момента инерции

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = M_d - M_c. \quad (2)$$

Как показано выше, момент сопротивления при ледовой нагрузке может быть достаточно точно разложен в ряд Фурье. Тогда в общем виде можно написать выражение

$$M_c = \sum_{k=0}^{\infty} M_{c1}(k) \cdot \cos(k \cdot \gamma) + \sum_{k=0}^{\infty} M_{c2}(k) \cdot \sin(k \cdot \gamma); \quad (3)$$

Высшие гармонические составляющие момента сопротивления и двигательного момента могут быть представлены в зависимости от угла поворота ротора  $\gamma$  в виде

$$M_d = \sum_{k=0}^{\infty} M_{d1}(k) \cdot \cos(k \cdot \gamma) + \sum_{k=0}^{\infty} M_{d2}(k) \cdot \sin(k \cdot \gamma); \quad (4)$$

Также можно представить частоту вращения в виде ряда по углу поворота ротора  $\gamma$

$$\omega(\gamma) = \sum_{k=0}^{\infty} \omega_1(k) \cdot \cos(k \cdot \gamma) + \sum_{k=0}^{\infty} \omega_2(k) \cdot \sin(k \cdot \gamma).; \quad (5)$$

Для решения уравнений (2) необходимо определение значений гармонических составляющих двигательного электромагнитного момента  $M_d$ . Это можно сделать на основании уравнения электромагнитного момента СДАМПР. При этом необходимо учесть гармонические составляющие токов статора [5]

$$M_d = (L_d - L_q) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (I_{q1}(k) \cdot \cos(k \cdot \gamma) + I_{q2}(k) \cdot \sin(k \cdot \gamma)) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (I_{d1}(k) \cdot \cos(k \cdot \gamma) + I_{d2}(k) \cdot \sin(k \cdot \gamma)) \quad (6)$$

С учетом выражения (2) и выражения для момента (7) можно написать равенства для косинусных и синусных составляющих момента сопротивления гармоники порядка  $x$

$$\begin{aligned} M_{c1}(x) &= (L_d - L_q) \cdot Z_{cos}(x) - J \cdot B_{cos}(x); \\ M_{c2}(x) &= (L_d - L_q) \cdot Z_{sin}(x) - J \cdot B_{sin}(x). \end{aligned} \quad (7)$$

Сложные гармонические синусные и косинусные составляющие в выражении (7) имеют вид:

$$\begin{aligned} Z_{cos} &= 0.5 \cdot \sum_{x=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \left( \begin{aligned} &I_{q1}(i) \cdot [I_{d1}(i-x) + I_{d1}(x-i)] + \\ &I_{q2}(i) \cdot [I_{d2}(i-x) - I_{d2}(x-i)] + \\ &I_{d1}(i) \cdot [I_{q1}(i+x) + I_{q1}(x-i)] - \\ &I_{d2}(i) \cdot [I_{q2}(i+x) + I_{q2}(x-i)] \end{aligned} \right); \quad (8) \\ Z_{sin} &= 0.5 \cdot \sum_{x=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \left( \begin{aligned} &I_{q1}(i) \cdot [I_{d2}(x-i) - I_{d2}(i-x)] + \\ &I_{q2}(i) \cdot [I_{d1}(i-x) + I_{d1}(x-i)] + \\ &I_{d1}(i) \cdot [I_{q2}(i+x) + I_{q2}(x-i)] - \\ &I_{d2}(i) \cdot [I_{q1}(x-i) - I_{q1}(i+x)] \end{aligned} \right); \\ B_{cos} &= 0.5 \cdot \sum_{x=0}^{\infty} \left( \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot \left( \begin{aligned} &\omega_2(i) \cdot \omega_1(i-x) - \omega_1(i) \cdot \omega_2(i-x) + \\ &\omega_2(i) \cdot \omega_1(x-i) + \omega_1(i) \cdot \omega_2(x-i) + \\ &\omega_2(i+x) \cdot \omega_1(i) - \omega_1(i+x) \cdot \omega_2(i) + \\ &\omega_2(x-i) \cdot \omega_1(i) + \omega_1(x-i) \cdot \omega_2(i) \end{aligned} \right) \right); \\ B_{sin} &= 0.5 \cdot \sum_{x=0}^{\infty} \left( \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot \left( \begin{aligned} &-\omega_1(i) \cdot \omega_1(i-x) - \omega_2(i) \cdot \omega_2(i-x) + \\ &\omega_2(i) \cdot \omega_2(x-i) - \omega_1(i) \cdot \omega_1(x-i) - \\ &\omega_1(i+x) \cdot \omega_1(i) - \omega_2(i+x) \cdot \omega_2(i) - \\ &\omega_2(x-i) \cdot \omega_2(i) - \omega_1(x-i) \cdot \omega_1(i) \end{aligned} \right) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидно, что в выражениях (8) и (9) гармоники не могут иметь отрицательного порядка. Поэтому значения токов и частот вращения при отрицательном порядке гармоник можно принять равными нулю.

Для идентификации ледовой нагрузки необходимо решение уравнения (9) в реальном времени. С целью обеспечения высокой точности идентификации необходимо произвести большое число измерений. Так как циклы ледовой нагрузки, как правило, привязаны к обороту винта [1, 2, 4] целесообразно производить измерения и корректировку нагрузки в течение одного оборота винта. Алгоритм и последовательность идентификации приведены на Рис. 2.

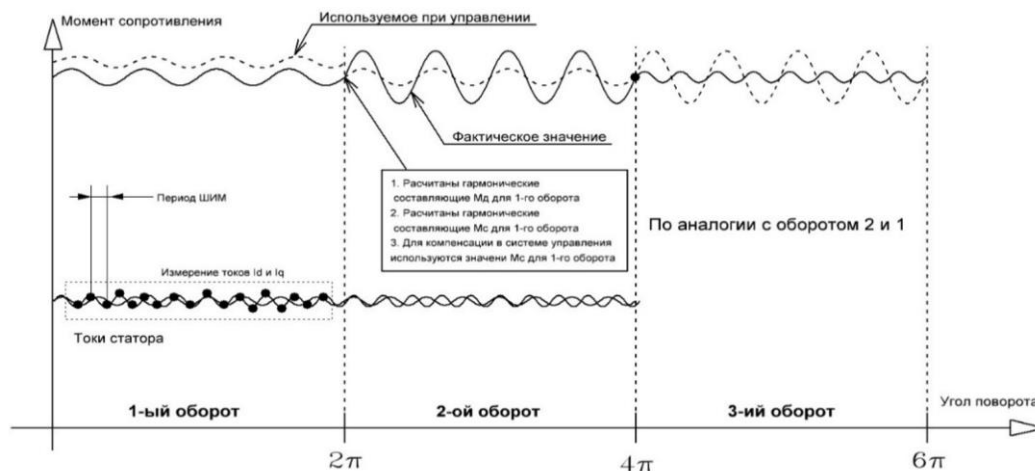


Рисунок 4 – Схема гребной установки ледокольного судна

Измерение токов производится без привязки к обороту винта так как используются для векторного управления, однако определение гармонических составляющих осуществляется 1 раз за оборот для вычисления момента сопротивления по формуле (8). Аналогично производится измерение частоты вращения.

**Заключение.** Для идентификации пульсаций момента гармонические составляющие в уравнениях представлены функциями угла поворота ротора, что позволяет без потерь времени осуществить преобразование Фурье и сравнивать полученные зависимости с аналогичными, используемыми в нормативной и научной документации.

При построении системы управления необходимо предусмотреть использование датчика угла поворота, поскольку преобразование Фурье основных величин уравнения (2) осуществляется именно по углу поворота. При этом целесообразна установка одновременно и датчика частоты вращения для измерения составляющих скорости (9) и датчика угла поворота для осуществления быстрого преобразования Фурье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riska K., Bridges R. Limit state design and methodologies in ice class rules for ships and standards for Arctic offshore structures //Marine structures. 2019. Т. 63. С. 462-479.
2. Wang C. et al. Numerical simulation of ice loads on a ship in broken ice fields using an elastic ice model //International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2020. Т. 12. С. 414-427.
3. Zhou L. et al. Numerical modeling of ice loads on an icebreaking tanker: Comparing simulations with model tests //Cold regions science and technology. 2013. Т. 87. С. 33-46.
4. Гельвер Н. В. и др. О моделировании нагрузки гребных электродвигателей ледоколов при проведении стендовых и виртуальных испытаний систем электродвижения //Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. №. 1 (399). С. 15-30.
5. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Хомяк В.А., Хайров Д.А. Синхронные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. 174 с.
6. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Белоусов И.В. Перспективы использования реактивных электрических машин в электроприводе // Труды IX Междунар. (X всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2016). Пермь: изд-во ПНИПУ, 2016. С. 359 – 363.
7. Гельвер Ф. А., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф., Саушев А.В. Гребной электропривод на основе реактивной электрической машины для судов ледового класса //Российская Арктика. 2024. Т. 6. №. 3. С. 15-25.
8. Гельвер Ф.А., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф., Хомяк В.А. Управление реактивной электрической машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 3 (389). С. 127-138.
9. Самосейко В. Ф., Шарашкин С. В. Анализ преимуществ реактивных электрических машин при построении гребной электрической установки //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. №. 2. С. 14-22.
10. Сеньков А. П., Кузнецов В.И., Никущенко Д.В., Фрумен А.И. Повышение надежности гребных установок с изменяющимся направлением тяги гребного винта для судов ледового класса //Морские интеллектуальные технологии. 2020. №. 2-2. С. 19-23.



УДК 621.311.6

**Артемьев<sup>1</sup> Б.В., Глухов<sup>2</sup> С.А., Ушнурцев<sup>3</sup> М.В.**

<sup>1,2,3</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва Россия

<sup>1,2,3</sup> boris@artemiev.su

## **МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ**

**Аннотация.** Анализируются методы измерения электрического тока в распределённых системах питания серверного оборудования и дается сравнительная оценка. Рассмотрены методы на основе резистивного шунта, трансформаторов тока, датчиков на эффекте Холла и магниторезистивных сенсоров. Проведены моделирование и экспериментальная проверка трёх схем на основе резистивного шунта (без усиления, с дифференциальным и инструментальным усилителями). Актуальность работы обусловлена ростом плотности размещения серверного оборудования и ужесточением требований к надёжности, эффективности и управляемости систем питания. Недостаточная точность или отсутствие адаптации методов измерения тока под специфику распределённой архитектуры приводит к снижению отказоустойчивости и неэффективному энергопотреблению. Целью работы является анализ и выбор наиболее рационального метода измерения тока для интеграции в распределённую систему питания серверов. Основными методами работы являются теоретический анализ существующих подходов, моделирование электрических схем, постановка и проведение лабораторных экспериментов, количественное сравнение полученных характеристик (линейность, коэффициент усиления, динамический диапазон). Результатом работы стало обоснование применимости метода резистивного шунта с дифференциальным усилителем, подтверждённое линейной зависимостью выходного напряжения от тока и стабильностью характеристик в заданном диапазоне. Разработанные рекомендации позволяют повысить точность и надёжность мониторинга тока в распределённых системах питания, что критически важно для адаптивного управления нагрузкой, раннего диагностирования сбоев и оптимизации энергопотребления в центрах обработки данных.

**Ключевые слова:** измерение тока, резистивный шунт, дифференциальный усилитель, инструментальный усилитель, распределённая система питания, серверное оборудование

**Artemyev<sup>1</sup> B.V., Glukhov<sup>2</sup> S.A., Ushnurtsev<sup>3</sup> M.V.**

<sup>1,2,3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1,2,3</sup> boris@artemiev.su

## **METHODS OF CURRENT MEASUREMENT IN DISTRIBUTED POWER SUPPLY SYSTEMS**

**Abstract.** This paper analyzes and compares methods for measuring electric current in distributed power supply systems for server equipment. Methods based on resistive shunts, current transformers, Hall effect sensors, and magnetoresistive sensors are considered. Three resistive shunt-based circuits (without amplification, with differential amplifiers, and with instrumentation amplifiers) were simulated and experimentally validated. The relevance of this work stems from the increasing density of server hardware and the increasingly stringent requirements for the reliability, efficiency, and manageability of power supply systems. Insufficient accuracy or the lack of adaptation of current measurement methods to the specifics of distributed architectures leads to reduced fault tolerance and inefficient energy consumption. The aim of this work is to analyze and select the most efficient current measurement method for integration into a distributed server power supply system. The primary methods include: theoretical analysis of existing approaches, electrical circuit modeling, laboratory experiments, and quantitative comparison of the obtained characteristics (linearity, gain, dynamic range). The study resulted in a justification for the applicability of the resistive shunt method with a differential amplifier, confirmed by the linear dependence of the output voltage on current and the stability of its characteristics over the specified range. The developed recommendations improve the accuracy and reliability of current monitoring in distributed power systems, which is critical for adaptive load management, early fault detection, and energy optimization in data centers.

**Keywords:** current measurement, resistive shunt, differential amplifier, instrumentation amplifier, distributed power supply system, server equipment

### **Введение**

Современные вычислительные системы, обеспечивающие постоянно возрастающие вычислительные мощности, требуют повышения плотности размещения серверного оборудования. Это, в свою очередь, приводит к росту энергопотребления, а также к ужесточению требований к эффективности, надёжности и управляемости систем электропитания [1]. В последнее время широкое распространение получили распределённые IoT (Internet of Things) системы, которые обычно объединяют датчики температуры, влажности, движения, освещённости, ионизирующих излучений, давления, дыма/газа, вибрации, датчики открытия дверей/окон, протечки воды и т.п.. Проблемы их электропитания связаны с обеспечением длительной автономной работы, ограниченной ёмкостью батарей и сложностью обслуживания тысяч устройств. Ключевые трудности включают необходимость оптимизации энергопотребления, низкую эффективность зарядки, нестабильность питания в промышленных условиях (IIoT, Industrial Internet of Things). Для обеспечения стабильной и безопасной работы сенсорных элементов и серверного оборудования необходима система мониторинга и управления параметрами энергопотребления на уровне каждой отдельной единицы встраиваемой системы. Такой подход не только повышает отказоустойчивость оборудования, но и позволяет существенно оптимизировать энергетические затраты [2].

Одним из наиболее важных параметров системы питания каждого отдельного элемента распределенной цифровой системы является электрический ток. Именно недостаточное или нестабильное обеспечение требуемого уровня тока зачастую становится причиной сбоев и выхода оборудования из строя. Например, исследование методов измерения тока играет важную роль для корректного подключения датчиков радиационных излучений [3].

Наибольшей популярностью среди методов измерения тока пользуется метод резистивного шунта. Помимо него также применяются методы, основанные на трансформаторах тока, а также датчиках Холла. Однако, несмотря на наличие разнообразных подходов к измерению тока, в большинстве серверных систем используются решения, не оптимизированные под специфику распределённой архитектуры питания. Что может привести к снижению общей эффективности системы питания, а также затрудняет реализацию адаптивного управления.

Целью настоящей работы является анализ и сравнительная оценка существующих схемотехнических методов измерения тока с последующим обоснованием выбора наиболее рационального решения для интеграции в распределённую систему питания серверов, учитывающую взаимные зависимости параметров питания.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

провести обзор основных методов измерения тока: резистивного шунта, трансформаторов тока, датчиков на эффекте Холла и магниторезистивных сенсоров.

выделить ключевые технические и эксплуатационные характеристики, релевантные для распределённых систем питания серверов, включая точность, диапазон измерений, наличие гальванической развязки, собственные потери мощности, скорость отклика, стоимость и возможность цифровой интеграции.

выполнить сравнительный анализ рассмотренных методов по указанным критериям.

обосновать выбор оптимального метода измерения тока, обеспечивающего баланс между точностью, энергоэффективностью, надёжностью, масштабируемостью в условиях распределённой архитектуры, а также стоимостью и сложностью разработки.

#### 1. Обзор литературы

Наиболее распространённым методом измерения тока считается метод резистивного шунта [4]. Этот метод заключается в измерении падения напряжения на шунтирующем резисторе, включённом в цепь последовательно (рисунок 1).

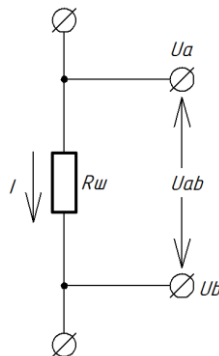


Рисунок 5 – Схема измерения тока с помощью резистивного шунта ( $R_{ш}$  – сопротивление шунтирующего резистора,  $U_a$  – напряжение цепи до шунта,  $U_b$  – напряжение цепи после шунта,  $U_{ab}$  – падение напряжения на шунте,  $I$  – измеряемый ток)

При протекании тока через резистор  $R_{ш}$  на нём падает напряжение  $R_{ab}$ , измерив которое можно вычислить силу тока  $I$  с помощью закона Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U_a - U_b}{R_{ш}} = \frac{U_{ab}}{R_{ш}}$$

Измерение напряжение производится с помощью АЦП, от которого во многом зависит итоговая частота и погрешность измерений. Для измерений можно использовать, как АЦП, реализованный в отдельно интегральной микросхеме, так и АЦП, встроенный внутрь микроконтроллера или реализованный с помощью ПЛИС [5].

Основная проблема метода измерения тока с помощью резистивного шунта заключается в том, что при увеличении тока, растёт не только падение напряжения, но и потребляемая мощность, что приводит не только к утери части мощности, что особенно важно в системах питания, но и к увеличению тепловыделения, которое может не только исказить результаты измерений за счёт теплового изменения сопротивления резистора, но и привести к разрушению шунтирующего резистора из-за чего будет нарушена целостность цепи питания у всего модуля.

Решением данной проблем является использование в качестве шунта резисторов с малым номинальным сопротивлением. Таким образом и потребляемая мощность, и

теплоотдача будут малы даже при больших токах. Но с уменьшением сопротивления резистора уменьшается и падение напряжение на нём, из-за чего для измерений необходимо использовать дифференциальный усилитель (рисунок 2, а) или его разновидность инструментальный усилитель (рисунок 2, б).

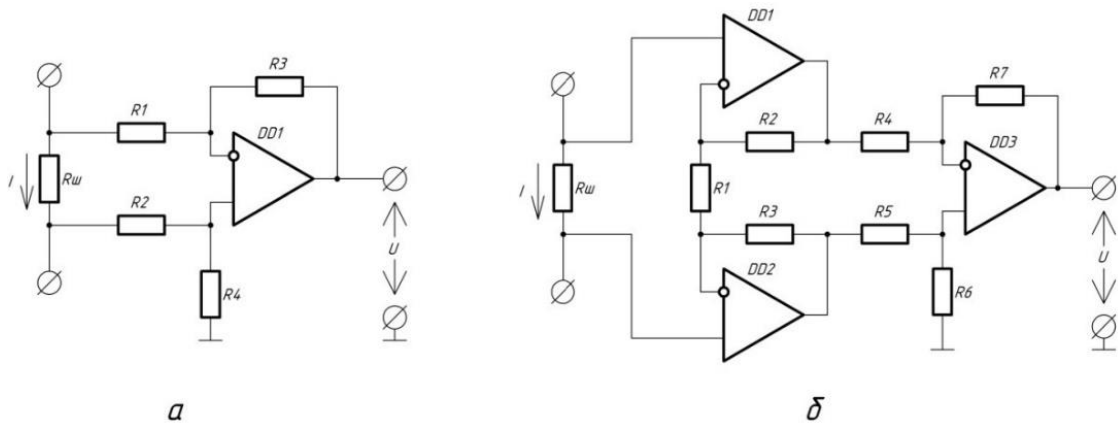


Рисунок 6 – Усилители: а – дифференциальный, б – инструментальный ( $U$  – выходное напряжение,  $I$  – измеряемый ток)

Данные схемы позволяют измерять крайне малые значения падения напряжения на шунтовом резисторе, при чём инструментальный усилитель обладает большим коэффициентом усиления и малым собственным шумом в отличие от обычного дифференциального усилителя [6].

Недостатком большинства схем измерения силы тока, основанных на методе резистивного шунта, является отсутствие гальванической развязки, из-за чего сбой в измеряемой цепи может вывести из строя систему измерения. Существуют схемы, которые решают проблему гальванической развязки, хотя основываются на методе резистивного шунта. Одна из них представлена на рисунке 3.

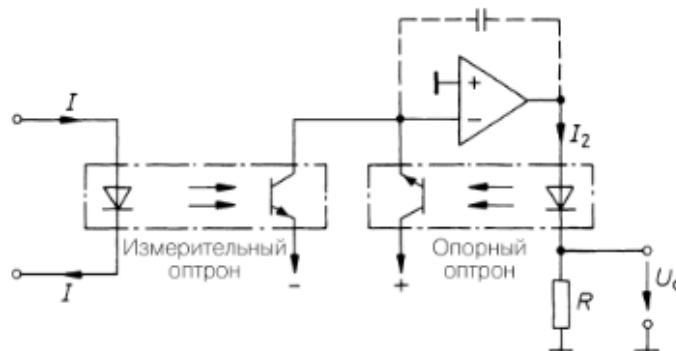


Рисунок 7 – Усилитель с развязкой для измерения тока [7]

Однако существуют и другие методы измерения тока, которые предполагают наличие гальванической развязки. Один из них – измерительный трансформатор тока. Данный прибор преобразует ток большой величины в значения, удобные для измерений, а также обеспечивает гальваническую развязку с измеряемой цепью [8].

Датчики на основе эффекта Холла и магниторезистивные являются довольно похожими методами измерения тока: они фиксируют воздействия магнитного поля на их чувствительный элемент и на основе реакции чувствительного элемента можно сделать вывод о величине измеряемого тока.

В датчиках на основе эффекта Холла при воздействии на элемент Холла магнитного поля, создаваемого током в проводнике, изменяется разность потенциалов между параллельными движению тока краями пластины [9]. Измерение этой величины даёт представление о величине измеряемого тока.

В магниторезистивных датчиках под воздействием магнитного поля, создаваемого током в проводнике, изменится электрическое сопротивление. Это изменение можно зафиксировать с помощью источника тока и АЦП, но для большей точности можно дополнительно использовать мостовые схемы [10, 11].

## 2. Методы и модели

Первым этапом стала выявленная проблема при мониторинге электропитания в рас-пределённых серверных системах, где использование неоптимизированных методов измерения тока приводит к снижению надёжности, точности и масштабируемости системы питания. В связи с этим был проведён анализ основных методов измерения тока.

Информация собиралась путём изучения научных статей, сборников конференций и технической документации производителей.

Результатом исследования стали обоснованный выбор предпочтительной схемотехники и её количественная оценка по линейности, величине погрешности, энергопотреблению и сложности реализации.

Результаты были обобщены и представлены в виде сравнительного анализа. Основными методами работы являются: анализ, моделирование, постановка эмпирических экспериментов, количественное сравнение характеристик и статистическая обработка полученных данных.

Для подбора наиболее подходящего метода измерения тока в распределённых системах питания серверного оборудования необходимо рассмотреть достоинства и недостатки всех описанных выше методов.

Метод, основанный на измерительном трансформаторе тока, подходит только для измерения переменного тока, поэтому может применяться только перед выпрямительным каскадом блока питания. Поскольку в большинстве случаев выпрямительный каскад входит в состав блока питания, с которого на серверное оборудование поступает постоянное напряжение, данный метод не подходит для измерения тока в распределённой системе питания серверного оборудования.

Датчики Холла и магниторезистивные датчики чаще всего применяются для измерения тока в проводах и кабелях. Их можно адаптировать под измерение тока в печатных проводниках, но из-за многослойности печатных плат, плотности трассировки и использования полигонов в печатных платах серверного оборудования их показания могут существенно отличаться от реальных из-за создаваемых другими проводниками и полигонами магнитных полей, поэтому эти два метода также не подходят для измерения тока в распределённых системах питания серверного оборудования [12 – 17].

Наиболее подходящим методом измерения тока в рассматриваемом случае является метод резистивного шунта. Но как было показано выше, применяя его, инженер может выбрать несколько отличных друг от друга схем.

Для выявления наиболее подходящей схемы для распределённой системы питания серверного оборудования были проведены эксперименты с каждой описанной схемой: с обычным резистивным шунтом, с дифференциальным усилителем, с инструментальным усилителем.

Замерялось выходное напряжение в зависимости от протекающего через шунт тока, создаваемого источником тока. Измерения проводились в диапазоне от 0 А до 10 А при резистивном шунте 0,01 Ом, что позволило сравнить различные схемотехнические решения между собой.

Также для каждой этой схемы было проведено моделирование с помощью программы «NIMultisim 14.3».

### 3. Результаты

Результаты моделирования схемы с резистивным шунтом приведены на рисунке 4.

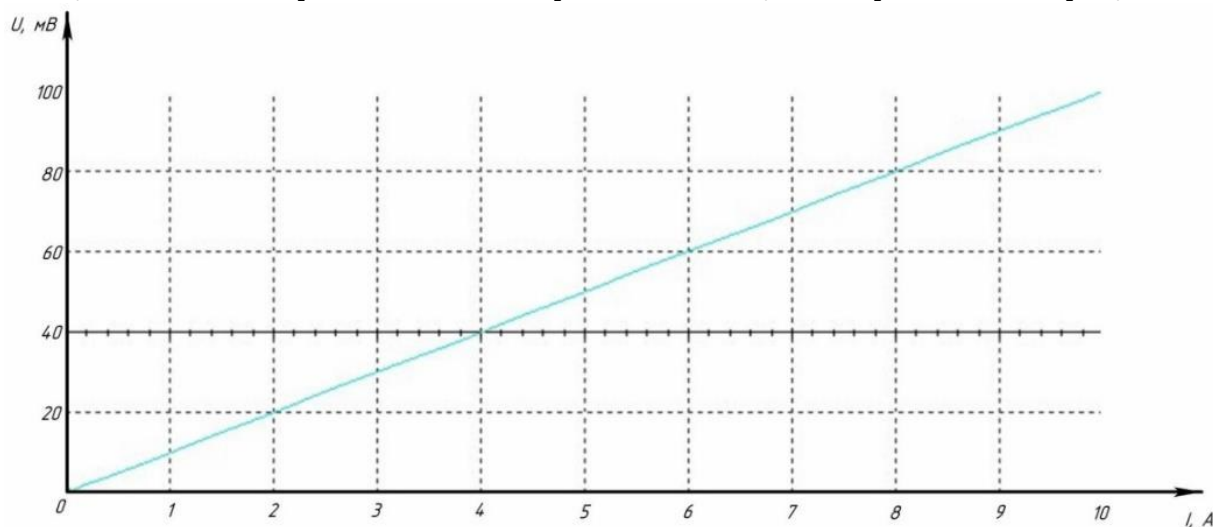


Рисунок 8 – Теоретическая зависимость выходного напряжения от протекающего тока для схемы с резистивным шунтом

Как видно из полученных теоретических значений при использовании схемы с резистивным шунтом выходное напряжение изменяется линейно при линейном изменении тока с коэффициентом пропорциональности равным сопротивлению резистивного шунта.

Результатами моделирования схем с дифференциальным и интегральным усилителями являются аналогичные прямые, только с коэффициентом пропорциональности равным не сопротивлению резистивного шунта, а 0,33. Данный коэффициент был подобран для возможности измерений с помощью микроконтроллеров STM32, а также прочих устройств с номинальным питанием в 3,3 В.

Экспериментальные измерения проводились с шагом 50 мА.

Зависимость выходного напряжения от протекающего тока для схемы с резистивным шунтом представлена на рисунке 5.

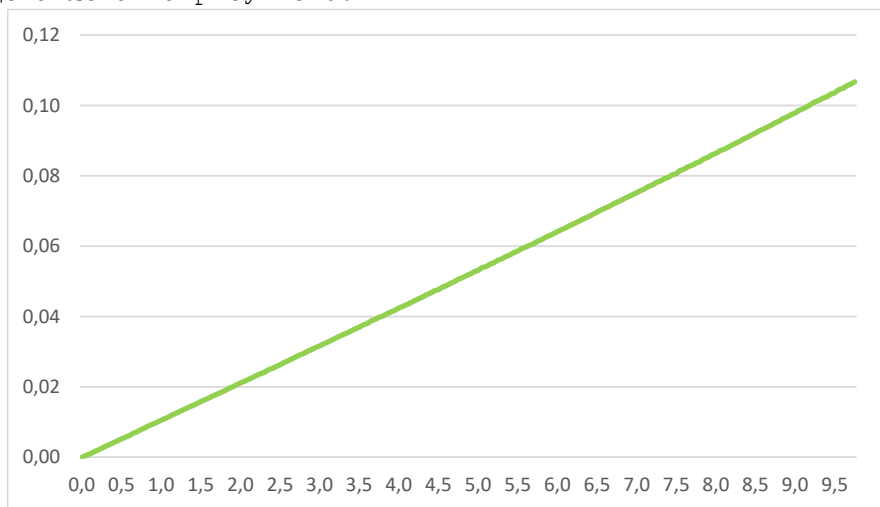


Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость выходного напряжения от протекающего тока для схемы с резистивным шунтом

На основе полученного графика можно сказать, что изменение протекающего тока в схеме с резистивным шунтом приводит к линейному изменению выходного напряжения схемы, что согласуется с полученными результатами моделирования. Однако в полученном графике коэффициент пропорциональности больше, чем номинальное сопротивление резистивного шунта, что обусловлено несовпадением номинального и реального сопротивления.

Зависимости выходного напряжения от протекающего тока для всех трёх рассматриваемых схем представлены на рисунке 6.

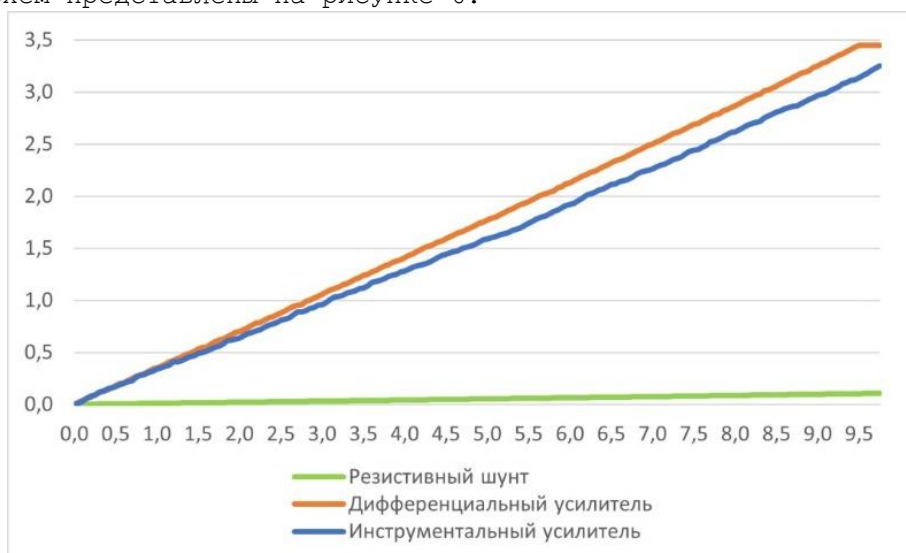


Рисунок 10 – Экспериментальные зависимости выходного напряжения от протекающего тока для трёх схем

Как видно по полученным экспериментальным данным при линейном изменении тока выходное напряжение схем также изменяется линейно, что согласуется с теоретическими данными, однако коэффициент пропорциональности у схем с инструментальным и дифференциальным усилителями отличается не только от номинального (0,33), но и друг от друга, что обусловлено несоответствием реальных и номинальных сопротивлений, которые задают коэффициенты усиления.

Также важно отметить, что в схеме дифференциального усилителя коэффициент усиления получился больше номинального, из-за чего выходное напряжения достигло максимального выдаваемого операционным усилителем напряжения раньше, чем ток достиг значения 10 А.

## 5. Обсуждение

На основе полученных в результате экспериментов данных можно сказать, что каждая из трёх схем: с резистивным шунтом, дифференциальным и инструментальным усилителем, во время эксперимента показала результаты аналогичные с теоретическими.

Схема с резистивным шунтом является наиболее простой и применима только в цепях с небольшим током. Как видно из рисунка 10 измеряемое выходное напряжение в разы ниже, чем у других схем, а при увеличении диапазонов тока, за которым последует уменьшение сопротивления шунта, оно может стать совсем несущественным для измерительных приборов, поэтому данная схема применима только на небольших диапазонах, а также небольших значениях токов.

Схема с дифференциальным усилителем более универсальна и может применяться с малым сопротивлением шунта, однако требует точной настройки коэффициента усиления, т.к. отличие реального и номинального сопротивления резисторов этой схемы может привести к некорректным результатам.

Схема с инструментальным усилителем ведёт себя аналогично со схемой с дифференциальным усилителем, однако, т.к. в схеме используется большее количество резисторов, от которых зависит итоговый коэффициент усиления, она требует ещё более тонкой настройки. Данную схему стоит применять для цепей, где требуется высокая точность измерений, поскольку усиление падения напряжения на шунте распределяется на несколько операционных усилителей из-за чего схема создаёт меньше шума и имеет лучше параметры в сравнении с дифференциальным усилителем.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что для распределённой системы питания серверного оборудования лучшим образом подойдёт метод измерения тока на основе резистивного шунта с добавлением схемы дифференциального усилителя. Такой подход обеспечит измерение токов в необходимом диапазоне, а также не сильно увеличит стоимость и сложность разработки оборудования.

## Заключение

Результатом проведённого исследования стало обоснование применимости метода измерения тока на основе резистивного шунта с применением дифференциального усилителя для распределённых систем питания серверного оборудования.

Показано, что методы на основе трансформаторов тока и магниточувствительных датчиков: датчики Холла и магниторезистивные – не обеспечивают достаточной точности и стабильности в условиях многослойных печатных плат с высокой плотностью трассировки.

Эксперимент, проведённый для трёх схем на основе метода резистивного шунта – без усилителей, с дифференциальным усилителем и с инструментальным усилителем – показал, что схема с дифференциальным усилителем продемонстрировала оптимальный баланс между точностью, а также стоимостью и сложностью разработки, что делает её наилучшим выбором для измерения тока в распределённых системах питания серверного оборудования.

Для более полного обоснования использования в распределённых системах питания встраиваемых систем метода резистивного шунта с дифференциальным усилителем стоит провести ряд экспериментов, где описанные методы будут рассмотрены в большем диапазоне токов.

Благодарности: Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSN-2024-0086.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulikov N., Yaitskaya E., Shvedova A., Zhalnin V. Power Consumption Meter for Energy Monitoring and Debugging // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – Vol. 220. – P. 499–511. – DOI: 10.1007/978-981-33-6632-9\_44 .
2. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K., Rasuk A., Smutka L. Predictive demand analytics and machine learning in electric power systems for enhancing resilience and efficiency // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2025. Т. 42. С. 101722.
3. Kuznetsov V.V., Andreev D.V., Andreev V.V., Piskunov S., Popov A.I. The Compact Model Synthesis for the RADFET Device // Technologies. 2025. Vol.13. P.492(1-18).
4. Электрические измерения (с лабораторными работами): учебник для техникумов / Р. М. Демидова-Панферова, В. Н. Малиновский, В. С. Попов и др.; под ред. В. Н. Малиновского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.: ил.
5. Мокринский А. А., Бойцов А. К. Микроконтроллеры AVR и STM32 // Информационные системы и технологии: теория и практика: сборник научных трудов / отв. ред. М. Р. Вагизов. – Вып. 15. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, 2023. – С. 120–125.
6. Вагапов Р. Р., Перспективы применения мультидифференциальных операционных усилителей в информационно-измерительных системах // Достижения и перспективы научных исследований молодежи: материалы XX студенческой научно-практической конференции, посвящённой 90-летию УГАТУ и 45-летию филиала в г. Кумертау (Кумертау, 12–13 апреля 2022 г.). – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 850–855.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. Т. II / пер. с нем. – 12-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил. – ISBN 5-94074-148-7.

8. Будников А. И., Беленцов С. Е., Бекетов А. Н., Бекетов И. Н. Измерительные трансформаторы тока // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых учёных: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок (Курск, 1 декабря 2023 г.). – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 172-174.
9. Гуйдалаев М. Г., Строгий П. А., Ерлагаев В. Ш. Эффект Холла – идеальная технология измерения // Мировые научные парадигмы в цифровую эпоху: взгляд в будущее : материалы VIII Международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 30 октября 2022 г.). – Т. 2. – Ростов-на-Дону: ООО «Манускрипт», 2022. – С. 100-103.
10. Ажаева Л. А., Грабов А. Б., Суханов В. И., Суханова Н. Н. Магниторезистивный датчик тока: пат. 2601281 Рос. Федерация / заявитель и патентообладатель АО «Научно-производственное объединение измерительной техники». – № 2015128397/28; заявл. 13.07.2015; опубл. 27.10.2016, Бюл. № 30.
11. Источники электропитания в приборостроении: учебное пособие / Б. В. Артемьев, В. Г. Костиков, В. А. Шахнов. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. – 430, [2] с.: ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 7).
12. Гриднев В.Н., Емельянов Е.И., Власов А.И., Карпунин А.А. Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде ALTIUM DESIGNER: управление проектом // Датчики и системы. 2016. № 6 (204). С. 46-52.
13. Бардик Э.Р., Власов А.И., Киселев П.Д., Селиванов К.В. Визуальное системное проектирование комплексов предиктивной аналитики в энергетике // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2024. Т. 2. С. 91-102.
14. Власов А.И., Григорьев П.В., Кривошеин А.И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2 (22). С. 26-35.
15. Власов А.И., Иванов В.В., Косолапов И.А. Методы упреждающего прогнозирования состояния широкополосной сети связи // Программные продукты и системы. 2011. № 1. С. 3-6.
16. Юрков Н.К., Андреев П.Г., Жумабаева А.С. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2015, Том 1. С. 201-203.
17. Воробьев А.Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем – М.: Эко-Трендз, 2002. – 280 с.: ил.

УДК 681.586:629.78

**Жалнин<sup>1</sup> В.П., Ларионов<sup>2</sup> Ю.Д., Недорезов<sup>3</sup> С.К.**

<sup>1,2,3</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1,2,3</sup> zhalnin@mail.ru

## **ДАТЧИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ВЫЗОВЫ**

**Аннотация.** Представлен обзор современного состояния и перспектив развития датчиков для регистрации космического излучения. Рассмотрено влияние космического излучения на технические системы, приведена классификация датчиков по расположению в пространстве и по принципу действия. Проанализированы физические принципы работы каждого типа датчиков, их достоинства и недостатки. Описаны ключевые научные задачи, решаемые с помощью данных устройств: изучение источников первичного космического излучения сверхвысоких энергий и мониторинг радиационной обстановки. В качестве примеров реализованных решений рассмотрены эксперимент «ПАМЕЛА» (магнитный спектрометр), гамма-обсерватория TAIGA (комплекс детекторов на основе эффекта Вавилова – Черенкова и сцинтилляционных детекторов) и спектрометр «СКАН-3».

**Ключевые слова:** космическое излучение, датчики ионизирующего излучения, фоточувствительные элементы, сцинтилляционные детекторы, гейгеровские счетчики, комплекс детекторов на основе эффекта Вавилова-Черенкова, гамма-телескопы, радиационный мониторинг, микрофонный эффект, алмазные детекторы

**Zhalnin<sup>1</sup> V.P., Larionov<sup>2</sup> Y.D., Nedorezov<sup>3</sup> S.K.**

<sup>1,2,3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1,2,3</sup> zhalnin@mail.ru

## **SENSORS FOR DETECTING COSMIC RADIATION: CURRENT ACHIEVEMENTS AND CHALLENGES**

**Abstract.** The article provides an overview of the current state and prospects for the development of sensors for detecting cosmic radiation. The influence of cosmic radiation on technical systems is considered, the classification of sensors by location in space and by the principle of operation is given. The physical principles of operation of each type of sensors, their advantages and disadvantages are analyzed. The key scientific tasks solved with the help of these devices are described: the study of sources of primary cosmic radiation of ultrahigh energies and monitoring of the radiation situation. The PAMELA experiment (magnetic spectrometer), the TAIGA gamma-ray observatory (complex of Cherenkov and scintillation detectors) and the SCAN-3 spectrometer are considered as examples of implemented solutions.

**Keywords:** cosmic radiation, ionizing radiation sensors, photosensitive elements, scintillation detectors, Geiger counters, Cherenkov – Vavilov detector complex, gamma-ray telescopes, radiation monitoring, microphone effect, diamond detectors

Введение. Достижения в области регистрации космического излучения помогают прогнозировать космическую погоду и выяснять механизмы ускорения частиц до громадных энергий. Излучение космических источников охватывает диапазон от гамма-лучей и рентгеновского диапазона до коррелированных потоков релятивистских частиц и нейтрино[1]. Регистрация подобного излучения требует совокупности датчиков с различной физикой отклика, суммарно обеспечивающих энерговосстановление, траекторию и время пролета частицы, идентификацию заряда и вида частиц, а также эффективную фильтрацию фона в условиях вакуума и радиационного воздействия [2, 3].

Современные задачи датчиков для регистрации космического излучения можно сформулировать следующим образом: во-первых, охват больших площадей активной поверхности при минимальной массе и энергопотреблении; во-вторых, обеспечение высокой энергоплотности и угловой разрешающей способности для корректной реконструкции траекторий и массы частиц; в-третьих, устойчивость к радиации, термальные колебания и долговечность в условиях космической среды; в-четвертых, калибровочная совместимость между различными детекторами и платформа-независимая обработка данных. Современные подходы активно развиваются в сторону мультidetекторных комплексов, интеграции на спутниковых конstellляциях и зондах, а также внедрения наноматериалов и микроэлектронных решений на борту [4-7].

В современном мире наблюдается стремительное развитие космической отрасли. Большинство космических миссий на данный момент располагаются на земной орбите и являются автономными. Однако, дальнейшее развитие космической отрасли, подразумевает усложнение космических миссий: космические аппараты будут располагаться дальше от земной поверхности, могут быть спланированы пилотируемые миссии на другие небесные тела. При планировании подобных космических миссий важно учитывать такое явление как космическое излучение, поскольку оно существенно влияет как на живые организмы, так и на космическую технику. Датчики космического излучения обладают исключительной важностью для сложных космических миссий: они не только позволяют проводить астрофизические исследования, но и отслеживать текущий уровень радиации на космических кораблях, что важно для благополучия и здоровья космонавтов, и для работоспособности более чувствительной техники. Отсюда следует, что развитие подобных датчиков, способных отслеживать



параметры космического излучения, в данный момент времени является актуальным и требует повышенного внимания. Материалы исследований направлены на улучшение параметров датчиков ионизирующего излучения: увеличение чувствительности датчиков, повышение их эффективности и надежности.

Целью исследования является обзор современных достижений в области развития датчиков для регистрации ионизирующих излучения.

Задачами исследования является:

- анализ научных задач, решаемых при помощи датчиков космического излучения,
- классификация датчиков космического излучения по расположению в пространстве,
- классификация датчиков космического излучения по принципу действия,
- обзор различных технических реализаций датчиков космического излучения,
- анализ существующих проблем и вызовов в области датчиков для регистрации космического излучения,
- обсуждение полученных результатов и формулировка рекомендаций.

1. Влияние космического излучения на электронную аппаратуру и определение датчика регистрации космического излучения.

Космическое излучение – поток высокоэнергетических частиц космического происхождения. Частицы космического излучения имеют следующее распределение: ядра водорода (протоны) – около 90%, ядра гелия (альфа частицы) – около 8%, ядра более тяжелых элементов – 2% [1]. Столкновение с высокоэнергетичными частицами может вызвать серьезные повреждения, как живых организмов, так и технических систем, что впоследствии может пагубно отразиться на процессах жизнедеятельности и работоспособности устройств. Поэтому важно иметь средства измерения и оценки различных параметров космического излучения. Таковыми средствами и являются датчики для регистрации космического излучения.

Существует ряд важных параметров космического излучения [2]:

- вид излучения,
- состав излучения (совокупность входящих в поток частиц),
- энергия частиц (порядка  $1 - 10^{15}$  МэВ),
- плотность потока частиц (порядка  $10^4 - 10^{12}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>).

Основные виды излучения [2]:

- галактическое,
- солнечное,
- естественных радиационных поясов Земли,
- искусственных радиационных поясов Земли.

Одна часть излучения поглощается космическими аппаратами, другая часть достигает атмосферы и поверхности Земли, образуя вторичные космические частицы, которые в свою очередь поглощаются техническими системами, находящимися на поверхности Земли. На рисунке 1 продемонстрирован процесс образования частиц при воздействии космического излучения [4]:

Для устойчивой работы космический аппарат должен стабильно сохранять свое положение в пространстве, а также сохранять способность к навигации. В этой связи, значимым является влияние космического излучения на системы стабилизации и навигации космических аппаратов – звездные датчики [5]. В этой работе проведен анализ зависимости параметров различных звездных датчиков от различных параметров космического излучения – плотность, энергия излучения.

Как правило, источником космического излучения являются небесные тела, обладающие достаточно высоким энерговыделением. Поэтому в Галактике основным источником космического излучения являются вспышки сверхновых [1].

Основным источником космического излучения, находящимся в непосредственной близости с Землей, является Солнце, поэтому широкое распространение имеют датчики для регистрации космического излучения на основе фоточувствительных элементов.

Разложение солнечного излучения в спектре таково [6]:

- 50% – видимая часть спектра (400–750 нм),
- 8% – ультрафиолетовая часть спектра (>760 нм),
- 42% – инфракрасная часть спектра (<400 нм).

Используются такие серии фотодиодов как: ФД, КДФ, УДФ, ФПУ [6].

Помимо датчиков с фоточувствительными элементами также используются гейгеровские, сцинтилляционные и черенковские датчики, гамма-телескопы [1, 7].

2. Принципы действия датчиков регистрации космического излучения

Принципы действия современных детекторов базируются на фундаментальных процессах взаимодействия излучения с веществом. Когда частица проходит через среду детектора, она тратит свою энергию на взаимодействие с атомными электронами и ядрами.

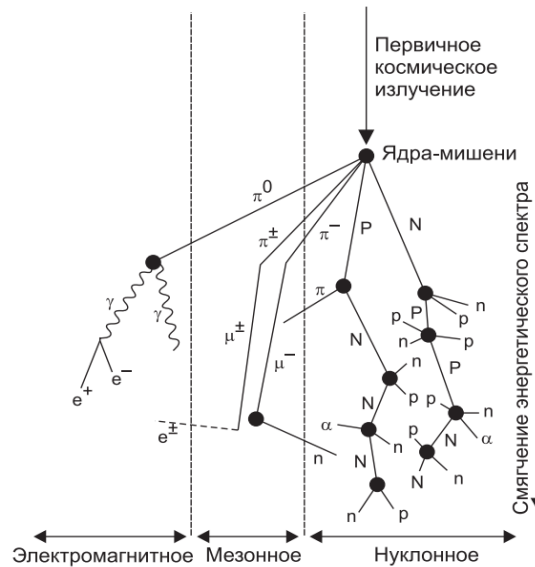


Рисунок 1 – Механизм образования частиц при воздействии космического излучения [4]

Именно характер этого взаимодействия лежит в основе классификации методов регистрации и определяет, какую именно информацию о частице (ее энергию, заряд, скорость, направление прихода) мы можем получить.

Классификация датчиков космического излучения по принципу действия представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация датчиков космического излучения по принципу действия

Среди космических аппаратов, находящихся на орбите Земли одним из наиболее распространенных видов датчиков космического излучения, являются фотоувствительные элементы [6]. Основным элементов в фотоувствительных датчиках являются преобразователи излучения, в качестве которых могут выступать фототранзисторы, фотодиоды, фоторезисторы, пирозлектрики [8]. Принцип работы полупроводниковых фотоувствительных элементов основан на режиме обратного смещения: при увеличении светового потока, проходящего через элемент, ток увеличивается [8, 9]. Принцип работы фоторезисторов основан на изменении его электрического сопротивления в зависимости от уровня освещенности [8]. Фотоувствительные элементы помещаются в непрозрачный корпус, в котором есть прозрачное окно, через которое на фотоэлемент попадает свет [7, 9]. В зависимости от уровня освещенности параметры электрической цепи, в которой располагается фотоэлемент, изменяются и на основе анализа изменений этих параметров можно судить о степени освещенности космического аппарата [10].

Ионные, газовые и сцинтилляционные детекторы остаются основой регистрации первичных частиц в релятивистских потоках и космических лучах. Газовые детекторы, включая пропорциональные камеры и микрокапельные детекторы, обеспечивают широкий диапазон датируемых энергий и возможность восстановления траектории по нескольким слоям. Сцинтилляционные детекторы дают высокую световую выходную сигнализацию и хорошую энергоплотность, но требуют эффективной калибровки светопередачи и шумоподавления. Преимущества таких датчиков включают относительную простоту конструкции и гибкость архитектуры против разнообразия частиц. Ограничения связаны с радиационной стойкостью материалов и зависимостью откликов от угла прилета частиц [7, 11–15].

Еще одним распространенным датчиком регистрации космического излучения является гейгеровский датчик [7]. Такие приборы работают на основе явления ионизации газа, находящегося внутри специальной емкости при воздействии на него ионизирующего излучения. Такие датчики могут измерять альфа-, бета- и гамма-излучение [11]. Данные датчики обладают рядом достоинств: высокое быстродействие, простота в использовании, устойчивость к высоким температурам [11 – 13]. После воздействия на газ ионизирующего излучения, число ионизированных атомов газа регистрируется специальным детектором, с помощью чего можно говорить об уровне воздействующего ионизирующего излучения [11].

В отличие от гейгеровских датчиков, сцинтилляционные датчики работают на основе излучения света сцинтилляторами при взаимодействии с ними ионизирующего излучения. Преимуществом этих датчиков является высокая точность [10, 13, 14].

Принцип действия датчиков космического излучения основан на эффекте Вавилова-Черенкова: релятивистские частицы испускают свет при попадании в отрезок кварцевого световода и рассеиваются в разных точках специальной камеры. Измерение интенсивности света в каждой точке камеры позволит восстановить полную картину исходного светового луча и судить о его параметрах [16, 17].

Калориметры, в том числе электромагнитные калориметры и кристаллы люминесценции, используются для точного энергетического профилирования гамма-лучей и электрон-позитронных пар. Они позволяют строить пространственные и временные профили событий. Важные требования к таким детекторам – однородность отклика по площади, линейность и стабильность в космических условиях. Ограничения включают тяжесть и стоимость материалов, а также необходимость сложной калибровки и выверки кристаллических структур [18, 19].

Принцип действия калориметров базируется на развитии в веществе каскадных процессов (ливней) вторичных частиц. Когда первичная частица высокой энергии попадает в материал калориметра, она инициирует последовательность взаимодействий, в результате которых ее первоначальная энергия распределяется между множеством вторичных частиц. Эти вторичные частицы затем регистрируются детектирующими элементами, и суммарный сигнал оказывается пропорциональным энергии первичной частицы [17]. Классификация различных видов калориметров представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Классификация различных видов калориметров

По типу регистрируемых частиц:

- электромагнитные калориметры предназначены для измерения энергии электронов, позитронов и гамма-квантов, в них развитие ливня происходит за счет электромагнитных взаимодействий: тормозного излучения, рождения пар, ионизационных потерь [18];

- адронные калориметры используются для измерения энергии адронов, которые теряют свою энергию как в сильных, так и в электромагнитных взаимодействиях с веществом калориметра [18].

По конструктивному исполнению:

- адронные калориметры состоят из одного блока вещества, например, свинцового стекла, кристалла йодида натрия. Это вещество одновременно обеспечивает и потерю энергии первичной частицы, и измерение величины этой потерянной энергии [18].

- дискретные состоят из чередующихся слоев вещества с высокой плотностью (свинец, вольфрам, железо, уран), где частицы теряют энергию, и слоев детекторов (кремний, жидкий аргон, сцинтилляторы, газ), где измеряется энергия, выделяемая частицами каскада [18, 19].

Трекеры на основе газовых или твердых материалов, а также системы с магнитным полем, позволяют восстанавливать траекторию частиц. Трекеры способны обеспечить высокую угловую резольюцию и точность определения момента импульса, что особенно важно для определения массы и идентификации частиц в широких спектральных диапазонах. Проблемы включают увеличение объема и массы изделия, а также требовательность к калибровке геометрической эффективности [20–22].

Принцип действия трековых детекторов основан на регистрации возмущений, которые заряженная частица создает в чувствительной среде при прохождении. Пролетающая частица ионизирует атомы среды, оставляя вдоль своей траектории след из ионизированных атомов или возбужденных состояний. Этот след может быть визуализирован непосредственно, зафиксирован в фотографической эмульсии или преобразован в электрический сигнал.

К интегральным трековым детекторам относятся ядерные эмульсии, специальные стёкла, слюды, пластики и природные кристаллы [20].

Ядерные эмульсии обладают самым высоким пространственным разрешением среди всех трековых детекторов.

Камера эмульсионного облака – ключевая инновация в эмульсионной методике. Это многослойное соединение эмульсионных плёнок со слоями пассивного материала и расположенная перпендикулярно падающим частицам. Такая конструкция представляет собой трековый детектор высокого разрешения с возможностью трёхмерной реконструкции событий [20].

Современные эксперименты на ускорителях требуют принципиально иного подхода. Гибридная трековая система BM@N состоит из четырех станций кремниевой трековой системы (Silicon Tracking System – STS) и семи слоев GEM детекторов.

Каждый двусторонний датчик имеет по 1024 стрипа на каждой из сторон, расположенных с шагом 58 мкм. На N-стороне сенсора стрипы установлены строго вдоль направления магнитного поля, на P-стороне – под углом  $7,5^\circ$  по отношению к стрипам на противоположной стороне. Такая конфигурация позволяет получать пространственное разрешение до 17 мкм.

Модули объединяются в супермодули – наборы из 4–10 датчиков, закрепленных на легких углепластиковых фермах.

Для считывания сигналов используется специализированная интегральная микросхема STS-XYTER, которая позволяет считывать 128 каналов с сенсора, построена по потоковому принципу [22].

Системы времяпролетной спектроскопии (Time-of-Flight, ToF) позволяют оценивать скорость и энергетическое распределение частиц через измерение временных задержек между слоями. В сочетании с трекерами ToF способен улучшать идентификацию частиц путем корреляции траекторий и импульсов. Преимущества – высокая временная разрешающая способность и способность работать в условиях фона, особенно в космических миссиях с высокой частотой событий. Недостатки – требования к синхронизации и емкости бортовых систем обработки [22–24].

Оценка массы частиц по времени пролета определенного расстояния – эффективный способ идентификации в области низких и средних энергий.

Для эффективной идентификации требуются высокие временное и координатное разрешения детекторной системы. Как отмечается в работе [24] по эксперименту MPD (Multi-Purpose Detector), для того чтобы различать пионы и каоны в импульсном диапазоне 0–2.5 ГэВ/с и протоны от каонов в диапазоне 0–4.5 ГэВ/с, ToF должен иметь временное разрешение лучше, чем 100 пс.

Основные параметры времяпролетных систем включают [23]:

- геометрическую эффективность (полнота покрытия телесного угла),
- временное разрешение (определяет способность разделять близкие по времени события),
- координатное разрешение (влияет на точность привязки треков),
- радиационную стойкость компонентов,
- радиационную длину (минимальное количество вещества на пути частиц).

В качестве базового элемента современных времяпролетных систем выбраны многозачерные резистивные плоские камеры (МРПК). Их преимущества: низкая стоимость, высокая эффективность регистрации заряженных частиц и нечувствительность к наличию магнитного поля [23].

Типичная конструкция МРПК, разработанная в ОИЯИ для экспериментов NA61/SHINE и MPD, представляет собой трехстековую структуру [24].

Каждый стек содержит [24]:

- два внешних толстых стеклянных электрода толщиной 400 мкм,
- четыре внутренних тонких стекла толщиной 280 мкм,
- пять газовых зазоров, образованных монофиламентной леской диаметром 200 мкм.

Комбинация нескольких типов детекторов (мультidetекторные комплексы) позволяет повысить точность, снизить систематические погрешности и обеспечить лучшее разделение частиц по энергетике и заряду. Интеграция датчиков внутри единой архитектуры дает возможность автономной калибровки, кросс-валидации сигналов и улучшения устойчивости к фоновым процессам. Основные задачи включают согласование масштабов, временных задержек и единообразие данных между различными типами детекторов [6–25].

Сравнительная характеристика различных типов датчиков

Таблица 1

| Тип детектора                                   | Принцип действия                                                                                                                                                               | Основные преимущества                                                                                                                                                                            | Ограничения                                                                                                                                                                      | Типичные применения                                                                                                                                             | Примеры материалов/технологий                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Газовые детекторы</b>                        | Регистрация ионизации, создаваемой частицей в газовой среде. Образовавшиеся электроны и ионы собираются электрическим полем, создавая сигнал.                                  | Относительная простота конструкции, низкая стоимость, возможность покрытия больших площадей, широкий диапазон энергий, возможность восстановления траектории частицы по нескольким слоям.        | Низкая плотность вещества (слабый сигнал), ограниченная радиационная стойкость материалов, "мертвое время" после регистрации, зависимость отклика от угла прилета частицы.       | Трекинг в экспериментах на ускорителях, мониторинг пучка, мюнография, регистрация космических лучей, нейтринные эксперименты.                                   | Пропорциональные камеры, дрейфовые камеры, микроstriповые газовые камеры (MSGC), газовые электронные умножители (GEM), Microegas, строу-трекеры.              |
| <b>Сцинтилляционные детекторы</b>               | Частица возбуждает атомы вещества; при возврате в основное состояние атомы испускают фотоны (сцинтилляции), которые улавливаются фотоприемником (ФЭУ, SiPM).                   | Высокая световая выходная сигнализация, хорошая временная разрешающая способность (наносекунды), высокая эффективность регистрации, возможность измерения энергии частицы, гибкость архитектуры. | Требуют эффективной калибровки светопередачи, чувствительность к температурным изменениям, ограниченная радиационная стойкость некоторых материалов, необходимость шумодавления. | Триггерные системы, времяпролетные измерения (ToF), калориметрия, медицинская диагностика (ПЭТ), геологоразведка, космические эксперименты.                     | Пластические сцинтилляторы, кристаллы (NaI(Tl), CsI(Tl), BGO), жидкие сцинтилляторы, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), кремниевые фотоумножители (SiPM).      |
| <b>Черенковские детекторы</b>                   | Регистрация черенковского излучения – слабого свечения, возникающего при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде. | Позволяют определять скорость частицы и идентифицировать ее тип (по порогу и углу излучения), высокая временная разрешающая способность, работают в условиях высоких нагрузок.                   | Очень слабый сигнал (требуются высокочувствительные фотоприемники), требуют оптически прозрачной среды, ограничены сверхпороговыми частицами, сложность калибровки.              | Идентификация частиц в физике высоких энергий, нейтринные телескопы (вода, лед), детекторы космических лучей, регистрация широких атмосферных ливней.           | Вода, лед, кварц, аэрогель, стекло, газ (CO <sub>2</sub> , C <sub>4</sub> F <sub>10</sub> ), фотоэлектронные умножители (ФЭУ), микроканальные пластины (MCP). |
| <b>Полупроводниковые (кремниевые) детекторы</b> | Ионизация в полупроводнике создает электронно-дырочные пары, которые разделяются электрическим полем и собираются на электродах, формируя сигнал.                              | Высочайшее пространственное разрешение (микрометры), хорошее энергетическое разрешение, компактность, возможность создания микроstriповых и пиксельных структур, быстрое действие.               | Высокая стоимость, ограниченный размер чувствительной площади, деградация свойств при радиационном воздействии, необходимость охлаждения для снижения шумов.                     | Прецизионный трекинг (вершинные детекторы, внутренние трекары), измерение импульса в магнитном поле, спектрометрия заряженных частиц, космические эксперименты. | Кремниевые микроstriповые детекторы, пиксельные детекторы, дрейфовые детекторы, детекторы на основе CVD-алмаза.                                               |
| <b>Калориметры</b>                              | Полное поглощение энергии частицы в объеме детектора за счет развития каскада (ливня) вторичных частиц;                                                                        | Прямое измерение энергии частиц (включая нейтральные), возможность профилирования ливня (пространственное и временное),                                                                          | Большая масса (особенно для адронных калориметров), высокая стоимость материалов, сложность калибровки, зависимость от                                                           | Энергетическое профилирование электронов, позитронов, гамма-лучей и адронов, поиск нейтральных                                                                  | Электромагнитные: кристаллы (CsI, BGO, PbWO <sub>4</sub> ), свинцовое стекло. Адронные: сэндвичи свинец/железо +                                              |

|                                                     |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                     | суммарный сигнал пропорционален энергии первичной частицы.                                                                                                                                | хорошая энергоплотность, компактность.                                                                                                                                                                      | типа частицы (электромагнитный/адронный отклик).                                                                                                                                         | частиц, астрофизика частиц, эксперименты на коллайдерах.                                                                                              | сцинтилляторы, жидкоаргоновые калориметры.                                                                                               |
| <b>Твердотельные трековые детекторы (пассивные)</b> | Частица создает скрытые повреждения (латентные треки) в структуре материала; после химического травления поврежденные области проявляются в виде видимых микроскопических каналов.        | Интегральный режим (накопление информации за длительное время), не требуют электропитания и электроники в зоне экспозиции, высокая устойчивость к внешним воздействиям, малый вес и компактность.           | Трудоёмкость обработки (химическое травление, микроскопия), невозможность временной привязки события, ограниченный динамический диапазон по плотности ионизации.                         | Поиск сверхтяжелых ядер в космических лучах (метеориты), изучение галактических космических лучей, дозиметрия, геохронология, нейтронная физика.      | Ядерные эмульсии, специальные стекла (BP-1), слюды, пластики (CR-39, Makrofol), природные кристаллы (оливин из метеоритов).              |
| <b>Системы времени пролета (ToF)</b>                | Измерение времени пролета частицы между двумя (или более) детекторными плоскостями на известном расстоянии; по времени определяется скорость, а в комбинации с импульсом — масса частицы. | Высокая временная разрешающая способность (десятки пикосекунд), прямое измерение скорости частицы, способность работать в условиях фона, возможность идентификации частиц в широком спектральном диапазоне. | Требования к точной синхронизации и стабильности временных каналов, зависимость от длины базы, требования к быстродействию электроники и емкости бортовых систем обработки.              | Идентификация частиц в экспериментах на ускорителях, изучение состава космических лучей, нейтронная спектроскопия, медицинская физика (ПЭТ).          | Многозачерные резистивные плоские камеры (MRPC), сцинтилляционные счетчики с ФЭУ, микроканальные пластины (MCP-PMT), алмазные детекторы. |
| <b>Мультидетекторные комплексы</b>                  | Интеграция нескольких типов детекторов в единую архитектуру для получения полной информации о частице (траектория, импульс, энергия, скорость, заряд, тип).                               | Системная точность выше, чем у отдельных компонентов, возможность кросс-калибровки и взаимной валидации сигналов, лучшее разделение частиц по энергетике и заряду, снижение систематических погрешностей.   | Высокая сложность, огромные объемы данных, необходимость согласования масштабов и временных задержек, высокие требования к калибровке и выравниванию, большая масса и энергопотребление. | Крупные эксперименты на коллайдерах (ATLAS, CMS), астрофизические обсерватории (TAIGA), нейтринные эксперименты (OPERA), космические миссии (AMS-02). | Комбинация трековых, калориметров, ToF, черенковских детекторов, мюонных систем в единой механической и электронной архитектуре.         |

Гамма телескоп – это космический аппарат, предназначенный для исследования дискретных источников высокоэнергетического гамма-излучения, таких как пульсары, черные дыры, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного гамма-излучения, исследования гамма всплесков, гамма-излучения активного Солнца. Нейтронный детектор находится на нижнем уровне телескопа. Он используется для регистрации нейтронов утечки, которые находятся на более высоких уровнях гамма телескопа, и служит для подавления фона, создаваемого протонно-ядерной компонентой космических лучей при регистрации гамма квантов [26 – 28]. Сравнительная характеристика различных датчиков представлена в таблице 1.

Энергетические диапазоны различных видов датчиков представлены на рисунке 4. Рисунок 4 получен авторами на основе обобщения данных из литературы по методам регистрации космического излучения [6–28]. Для каждого типа детектора определен типичный рабочий диапазон энергий (в GeV), в котором эффективность регистрации превышает 50 %. Границы диапазонов взяты из экспериментальных обзоров. Построение выполнено в логарифмической шкале по оси энергии.

Ось Y: эффективность регистрации от 0 до 1.0. Ось X: энергия частиц в логарифмическом масштабе от 1 МэВ до 1 ПэВ.

У каждого детектора есть две критические точки: порог срабатывания и предел прозрачности/насыщения.

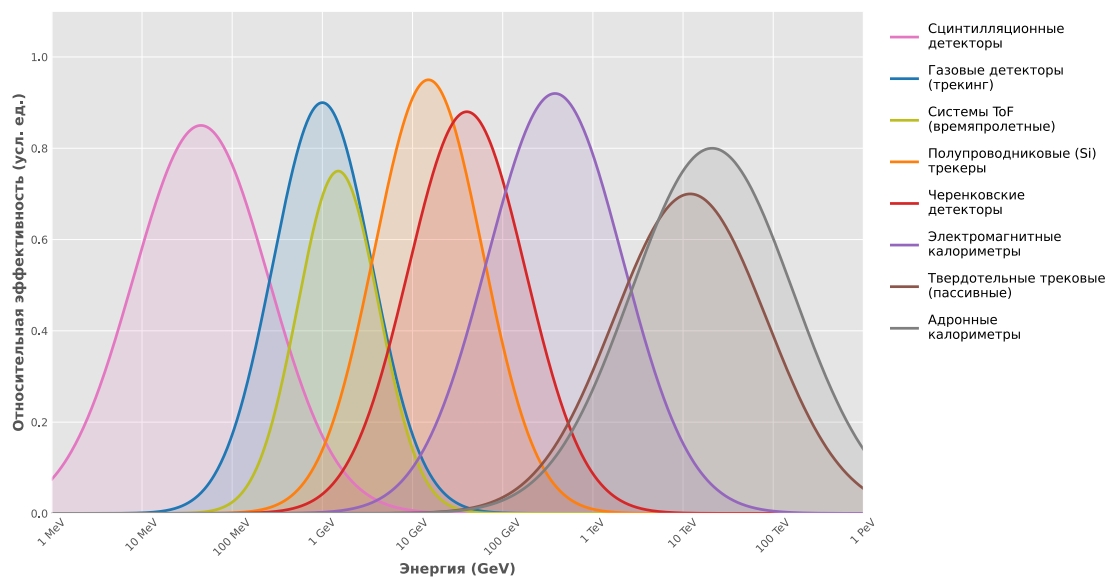


Рисунок 4 – Доступные диапазоны энергий для основных типов детекторов

Подъем: частице не хватает энергии, чтобы вызвать сигнал.

Спад: частица становится настолько энергичной, что пролетает детектор насквозь, не оставляя в нем достаточно информации, или ее траектория становится слишком прямой для измерения.

Каждый тип детектора имеет свой рабочий диапазон — куполообразный участок на графике.

Низкие энергии: здесь наиболее эффективны сцинтилляционные системы и газовые детекторы. Они позволяют точно определять скорость и траекторию медленных частиц.

Средние энергии: пик эффективности полупроводниковых детекторов.

Высокие и сверхвысокие энергии: на первый план выходят адронные калориметры и пассивные твердотельные трековые детекторы.

### 3. Современное состояние датчиков для регистрации космического излучения

В настоящий момент широкое распространение получили датчики космического излучения, принцип работы которых основан на регистрации черенковского излучения и сцинтилляционного эффекта [29–34], магнитные спектрометры и трековые системы [29], пропорциональные счетчики [35]. Большое внимание уделяется детекторам на основе кремния, которые позволяют получать более точные данные в энергетическом диапазоне 300 КэВ–10 ГэВ, обладают большей чувствительностью и разрешением, а также имеют малые габаритные характеристики [36, 37].

Современные датчики космического излучения позволяют проводить исследования частиц в широком диапазоне энергий (до 1020 эВ), обладают хорошим разрешением и чувствительностью.

### 4. Научные задачи, решаемые при помощи датчиков для регистрации космического излучения

Основные научные задачи, решаемые благодаря датчикам регистрации космического излучения:

- изучение источников первичного космического излучения высокой энергии [38, 39],

- мониторинг состояния радиационной обстановки на поверхности Земли и на космических аппаратах [40 – 43].

Работы [38, 39] анализируют использование сцинтилляционных датчиков для регистрации высокоэнергетических первичных излучений космического пространства. Регистрация подобного рода излучений, источниками которых являются высокоэнергетические структуры, позволяют открывать новые космические объекты: пульсары и остатки сверхновых звезд [38], что, несомненно, является важным инструментом при изучении топологии Вселенной.

Работы [40–43] анализируют процесс мониторинга уровня космической радиации на земной поверхности и при орбитальных и космических перелетах. Для определения природы космического излучения зачастую используются специализированные спутники, которые используют соответствующие датчики космического излучения [42, 43]. Подобные исследования позволяют выработать нормы действий космонавтов, пребывающих на орбитальных станциях и в открытом космосе [40]. Помимо обеспечения

безопасного уровня радиации, передающейся космонавтами, существенной задачей исследований по выявлению уровня космической радиации является актуализация математических моделей, определяющих действие радиации околоземных полей, а также актуализация данных, позволяющих конструировать космические аппараты для межзвездных перелетов [41].

5. Классификация датчиков космического излучения по расположению в пространстве

Классификация датчиков космического излучения по расположению в пространстве представлена на рисунке 4.



Рисунок 5 – Классификация датчиков космического излучения по расположению в пространстве

Выделяют две основные группы датчиков космического излучения:

- наземные [44],
- космические [45].

Космические датчики излучения в свою очередь делят на [7, 45]:

- околоземные,
- дальнего космоса.

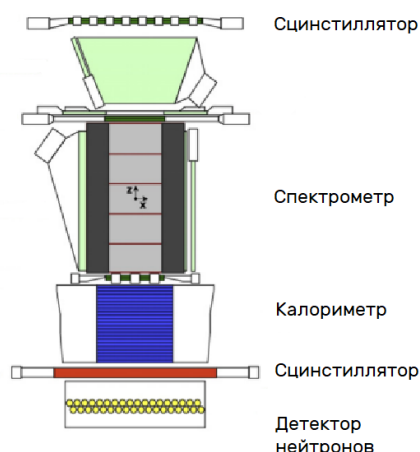


Рисунок 6 – Структура прибора, применявшегося в эксперименте ПАМЕЛА [48]

Задачей наземных датчиков космического излучения является мониторинг уровня радиации непосредственно на поверхности Земли и радиационные пояса Земли, которые оказывают серьезное влияние на живые организмы на поверхности Земли и на низкоорбитальные космические миссии [44]. Космические же датчики излучения специализируются на исследованиях топологии Вселенной, конкретизации математических моделей для расчета уровня радиации будущих космических миссий, мониторинг уровня радиации пилотируемых космических кораблей [7, 45].

6. Анализ решений по регистрации космических излучений

В качестве примеров датчиков космического излучения, применяющихся в настоящее время или применявшиеся сравнительно недавно, рассмотрим некоторые устройства и комплексы и проведем анализ их основных характеристик.

Эксперимент ПАМЕЛА проводился с помощью спутника Ресурс-ДК, с помощью которого осуществлялось непрерывное измерение потоков космического излучения. Основными элементами прибора являлись магнитный спектрометр и позиционно-чувствительный калориметр. В состав прибора входят времяпролетная система, ливневый сцинтилляционный счетчик, нейтронный детектор и система антисовпадательных счетчиков [27, 46, 47].



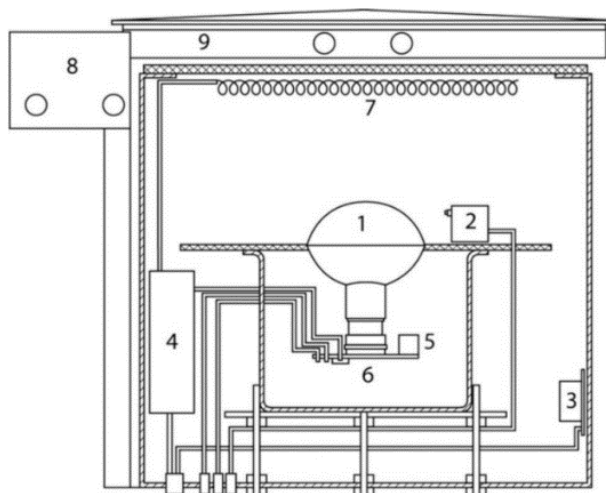
Подробные характеристики данного прибора приведены в работах [48, 49]. В таблице 2 представлены диапазоны энергий частиц, которые могли быть зарегистрированы прибором ПАМЕЛА.

Диапазоны энергий частиц, которые могли быть зарегистрированы Таблица 2 прибором ПАМЕЛА [48, 50]

| Тип излучения    | Антипротоны         | Позитроны           | Протоны           | Легкие ядра       | Электроны  |
|------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------|
| Диапазон энергий | 80 МэВ –<br>190 ГэВ | 50 МэВ –<br>270 ГэВ | 80 МэВ –<br>1 ТэВ | 20 МэВ –<br>1 ГэВ | До 600 ГэВ |

Максимальная детектируемая жесткость составляет  $\sim 1$  ГВ. Кроме того, по фитированной траектории имеется возможность определить направление прилета частиц в приборной системе координат с точностью около  $1^\circ$ .

Гамма-обсерватория TAIGA является одной из крупнейших в мире лабораторий, занимающихся регистрацией и изучением космического излучения. Комплекс располагается в Тункинской долине, недалеко от озера Байкал. Обсерватория занимается изучением широких атмосферных ливней, регистрируя сразу несколько компонентов ливня: заряженную компоненту, черенковское и радиоизлучение. В состав лаборатории входит: две системы датчиков TAIGANiSCORE и Tunka-133, которые представляют собой черенковские детекторы излучения; сцинтилляционная установка TAIGA-Muon; оптические черенковские телескопы TAIGA-IACT; система сцинтилляционных детекторов Тунка-Гранде. Различные части комплекса регистрируют определенные диапазоны энергий. Например, Tunka-133 изучает спектр первичного космического излучения, а также его массовый состав в диапазоне от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  эВ. TAIGANiSCORE выполняет те же задачи, что Tunka-133, но нижняя граница измеряемого диапазона начинается от  $\sim 2 \times 10^{14}$  эВ для протонов и от  $\sim 6 \times 10^{13}$  эВ для гамма-квантов. Для TAIGA-IACT основная цель – поиск и исследование локальных источников гамма-квантов с энергиями более  $10^{12}$  эВ [31, 33, 51, 52].



1 – фотоумножитель, 2 – светодиодный калибровочный источник, 3 – контроллер температуры, 4 – DC-DC преобразователь и управление нагревом спиралей на входном окне, 5 – предусилитель, 6 – делитель напряжения для фотоэлектронного умножителя, 7 – нагревательные элементы входного окна, 8 – моторизированный привод крышки, 9 – корпус оптического модуля [51]

Рисунок 7 – Схема оптического модуля Tunka-133 [50]

Комплекс ЯКУ ШАЛ располагается недалеко от г. Якутск. В состав установки входят наземные и подземные сцинтилляционные детекторы для регистрации электронов и мюонов, а также детекторы-ФЭУ (фотоэлектронные умножители), предназначенные для наблюдения за черенковским излучением. Черенковские детекторы в установке ЯКУ ШАЛ позволяют рассмотреть спектр космического излучения в диапазоне энергий  $10^{15} - 6 \times 10^{19}$  эВ. Измеряемая доля энергии ливневого каскада составляет более 70% [53].

На основе проведенных измерений с помощью установки был определен спектр космических лучей в диапазоне энергий  $10^{15} - 3 \times 10^{17}$  эВ. По результатам была подтверждена сложная форма спектра и наличие излома при энергии  $3 \times 10^{15}$  эВ. Измерения потоков мюонов в ШАЛ показывают смешанный состав космических лучей с долей протонов  $0,5 \pm 0,2$ . Также с помощью комплекса ЯКУ ШАЛ был установлен верхний предел доли фотонов в составе космического излучения в широком интервале энергий, определен верхний предел интенсивности интегрального потока фотонов [55].

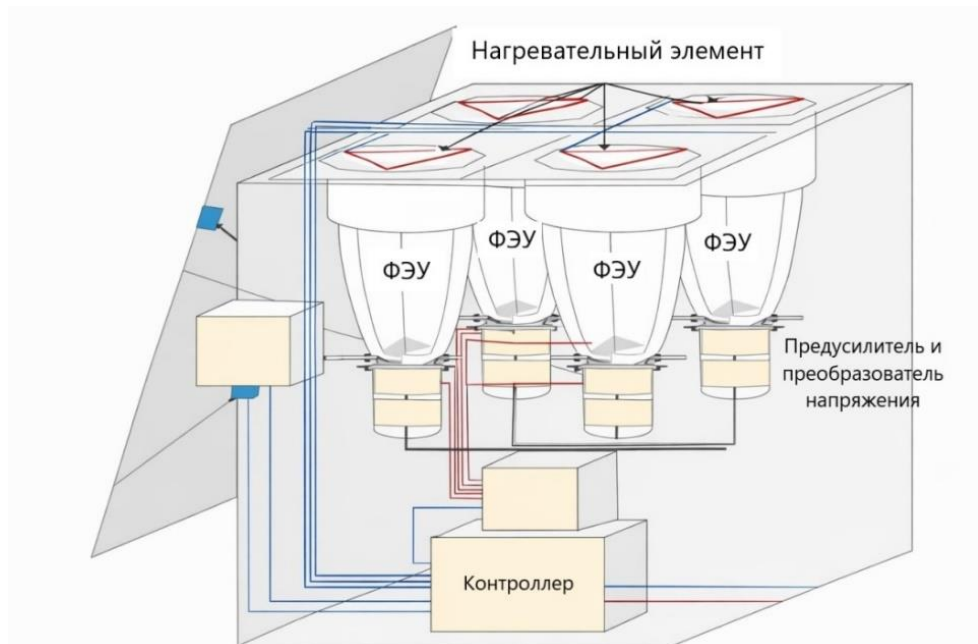


Рисунок 8 – Схема черенковского детектора в установке TAIGA-HiSCORE [52]

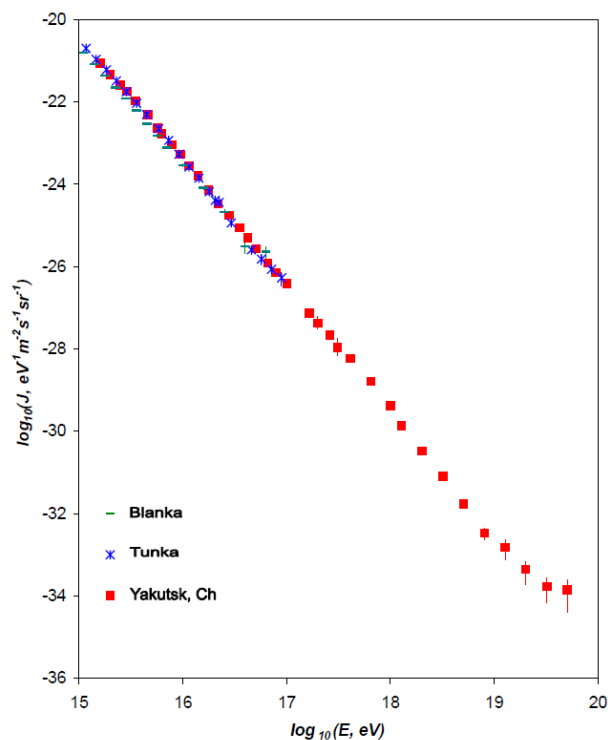


Рисунок 9 – Космическое излучение, измеренное с помощью черенковских детекторов на установках Blanka, Tunka, ЯКУ ШАЛ [53]



Рисунок 10 – Широкоугольный черенковский телескоп в установке ЯКУ ШАЛ [54]

## 7. Обзор проблем и направлений дальнейших исследований

Датчики регистрации космического излучения продолжают совершенствоваться и улучшаться. Однако на сегодняшний день существует ряд проблем, которые оказывают влияние на точность и стабильность работы сенсоров. Изучение проблем и поиск их решения проводятся в настоящее время. Рассмотрим некоторые из них.

Датчики регистрации космического излучения, как и измерительные приборы в целом, подвержены влиянию помех и шумов. Их источниками могут служить фоновое ионизирующее излучение, различные электромагнитные и механические воздействия. Например, датчики регистрации космического излучения, предназначенные для работы на орбите, подвергаются вибрационному воздействию, источниками которого могут быть вентиляторы на космической станции, гироскопы, механизмы изменения ориентации космического аппарата. Это воздействие приводит к проявлению микрофонного эффекта – возникновение переменного электрического поля под действием вибрации, которое создает шум в измеряемом сигнале [56]. В датчиках космического излучения полупроводникового типа возникновение шумов связано с токами обратной проводимости, наличием ловушек в его чувствительном объеме, наличием локальных центров захвата носителей заряда, а также неоднородностью кристалла датчика [57]. Снижение влияния помех и шумов позволит повысить чувствительность и точность датчиков регистрации космического излучения.

Улучшение параметров детекторов является одной из основных задач. Повышение разрешающей способности датчиков, энергоэффективности, надежности, массогабаритных характеристик, устойчивости к ионизирующему излучению и магнитным полям – все это представляет собой современные вызовы для датчиков регистрации космического излучения. Исследования различных материалов на соответствие перечисленным ранее параметрам позволили выделить ряд современных структур, которые являются перспективными для дальнейшего улучшения детекторов.

Так ортогерманат висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  имеет более высокую эффективность регистрации при том же объеме кристалла и обладает повышенным быстродействием разрешением, чем традиционные материалы неорганических сцинтилляционных датчиков.

Алмаз обладает высокой стойкостью к ионизирующему излучению, что замедляет деградацию структуры датчика. Он может обеспечить более высокое быстродействие за счет высокой подвижности и скорости насыщения носителей заряда. Большая ширина запрещенной зоны уменьшает токи утечки и уровень шума сигнала. Помимо этого, датчики на основе алмаза будут иметь более высокую чувствительность и высокую разрешающую способность сенсора, при небольших размерах чувствительного элемента. Многие полупроводниковые структуры представляют большой интерес для применения их в датчиках регистрации космического излучения.

Детектор на основе арсенида галлия GaAs площадью  $2\text{мм}^2$  при напряжении 250В имеет разрешение 1,9 кэВ для  $\gamma$ -линии 122 кэВ. Датчик на основе теллурида кадмия CdTe обладает повышенной эффективностью регистрации излучения, хорошим соотношением сигнал-шум и разрешением.  $\text{HgI}_2$  структуры имеют высокое энергетическое разрешение и малые токи утечки, что повышает их энергоэффективность [50–60].

Фотоэлектронные умножители, используемые в датчиках регистрации космического излучения, например в сцинтилляторах, также накладывают ограничения. Традиционный тип умножителя (вакуумный) имеет нестабильность характеристик во времени, высокое напряжение питания, низкую механическую прочность и существенную массу. Для возможного решения проблемы рассматривается переход на твердотельные фотоприемники: лавинный фотодиод, кремниевый фотоэлектронный умножитель, p-i-n фотодиод, фотодиод металл-диэлектрик. Все они отличаются низким напряжением питания, меньшей массой и потребляемой мощностью, высокой надежностью и стабильностью, нечувствительностью к магнитным полям. Помимо этого, фотоумножители этого типа имеют высокую линейность световой характеристики в широком диапазоне. Применение подобных твердотельных фотоприемников позволит повысить точность и эффективность регистрации излучения, улучшится энергоэффективность датчиков и их массогабаритные характеристики [60].

Широко используются и MIS (Metal-Insulator-Semiconductor – Металл-Изолятор-Полупроводник) датчики ионизирующих излучений, которые представляют собой полупроводниковые детекторы, использующие изменение свойств МДП-структур (металл-диэлектрик-полупроводник) или МОП-транзисторов под воздействием радиации. Они широко применяются для дозиметрии и контроля радиационной обстановки [61–63].

Закключение. Современные исследования в области детекции космического излучения демонстрируют значительный прогресс в создании чувствительных, устойчивых и энергоэффективных датчиков, способных работать в экстремальных условиях космического пространства. Современные датчики охватывают широкий диапазон частот и энергий, что позволяет комплексно изучать космическое излучение: от высокоэнергетических частиц до спектрально богатого фотонного излучения в

рентгеновском и гамма-диапазонах. Важнейшими достижениями являются повышение энергонезависимой и геометрической эффективности детекции, снижение шумов, увеличение разрешающей способности и улучшение времени разрешения, а также внедрение новых материалов и нанотехнологий.

Несмотря на достигнутые успехи, перед сообществом стоят комплексные вызовы. Повышенная радиационная устойчивость и длительная роботизированная автономия детекторов требуют новых подходов к защите материалов и схемотехнике. Устойчивость к микромеханическим и температурным воздействиям, а также снижение массы и мощности на полезную нагрузку остаются критическими ограничителями для пилотируемых миссий и глубокого космоса.

Перспективы дальнейшего роста связаны с интеграцией мультисекционных и гибридных систем, где сопоставление данных с разных типов датчиков (акселератор-лучевые детекторы, пиксельные фотодетекторы и энергопроводящие слои) позволит повысить достоверность регистрации и определить состав космических частиц с большим коэффициентом надёжности.

Развитие искусственного интеллекта и методов машинного обучения для онлайн-анализа сигналов и аномалий в реальном времени обещает существенно повысить оперативность обработки информации и оперативное управление миссиями [64–67].

В заключение можно констатировать, что современные датчики космического излучения демонстрируют устойчивый синергический прогресс в сочетании материаловедения, микроэлектроники, оптики и вычислительных методов. Их дальнейшее развитие существенно расширит научные горизонты космологии, астрофизики частиц и космических технологий, обеспечивая более глубокое понимание природы космического излучения, его источников и влияния на космические полеты.

Благодарности: Отдельные результаты получены в рамках Госзадания FSFN-2024-0086.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бережко Е. Г. Происхождение космических лучей: современное состояние проблемы // Наука и техника в Якутии. 2007. №2. С. 3–7.
2. Семкин Н. Д., Плохотниченко П. Г., Ильин А. Б., Калаев М. П., Рязанов Д. М., Помельников Р. А. Устройства для контроля радиационной обстановки на космическом аппарате // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. №1. С. 58–72.
3. Ryzhov S., Kuznetsov V., Andreev V. Corner Simulation of CMOS Analog Integrated Circuit Taking into Account Radiation Influence // Micromachines. 2026. Vol.17. No.3. pp.300(1–18).
4. Шиллинг У., Вейсс Р., Колпаков А. Космическое излучение и надежность силовой электроники // Силовая электроника. 2018. №1. С. 54–60.
5. Зайцев М.А., Петухов А.Б., Сергеев В.А. Анализ влияния космического излучения на функционирование звездных датчиков навигации и ориентации космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можаевского. 2015. №648. С.127–132.
6. Славкин И. Е., Пронин А. В. Датчиковая аппаратура для измерения характеристик космического пространства // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. №3. С. 37–42.
7. Нусинов А. А., Авдюшин С. И., Гинзбург Е. А., Назаренко А. И., Никитский В. П., Писанко Ю. В., Свидский П. М., Юдкевич И. С. Эффективность регистрации проникающих излучений на спутниках «Метеор» // Журнал Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. №8. С.197–210.
8. Волкова К.Ю., Киселева Д.В., Кулапин В.И. Приемные устройства оптического диапазона волн // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. №2. С.170–176.
9. Докучаев А.С., Захаров А.В. Фотодиоды и фотодиодные сборки производства ООО "Мэри" // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. №10. С.101–105.
10. Федотова Г.В., Самканавили Д.Г., Алкацева Т.Д., Сенцова Е.И., Самодуров П.С. Применение фотоэлектронного умножителя с микроканальными пластинами в качестве датчика сцинтилляционного спектрометра // Успехи прикладной физики. 2025. №6. С. 528–538.
11. Балашов В.Ю., Даминов И.Р., Королев И.С., Кудакеев Т.И., Старогородцев М.Д. Приборы радиационного контроля // XI Международная научно-практическая конференция "ЭТАП-2024", посвященная 220-летию КФУ. – Набережные Челны: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2024. С. 37–47.
12. Мамытова Д.К., Акимбекова Г.М., Ганиева А.С. Учебный макет регистрирующего устройства с применением счетчика Гейгера на основе микроконтроллера Atmega 328 // Вестник Кыргызского национального университета им. Жусупа Баласагына. 2017. №2. С.5–12.
13. Чемель А.В. Разработка макета детектора ионизирующего излучения на основе счетчика Гейгера-Мюллера // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2021. С. 257–258.
14. Бокатый И.О., Денисов В.М., Тимофеев А.В., Титов А.Б., Родригеш Ж.Ж.П.К., Коротаев В.В. Сцинтилляционные датчики гамма-излучения на основе твердотельных фотоумножителей в составе беспроводных сетей промышленного интернета // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. №5. С.633–645.
15. Бойченко А.П. Модернизация блока детектирования БДЖБ-07 бета-радиометра РКБ4-1еМ для использования в качестве универсального сцинтилляционного датчика // Научный альманах. 2024. №10-3. С. 96–117.
16. Ворошилов Д.А. Черенковский датчик поперечного распределения частиц пучка на основе кварцевого волокна // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Инструментальные методы и техника экспериментальной физики – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2016. С. 10.
17. Журов Д.П. Моделирование для наведения атмосферных черенковских телескопов в эксперименте Taiga // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2021. №4. С. 106–111.

18. Борисов С.В., Воронов С.А., Карелин А.В. Измерение энергии электронов и протонов калориметрами в физике космических лучей на спутниковых и баллонных экспериментах за последние 20 лет // Космические исследования. 2011. Т. 49. № 3. С. 259–273.
19. Карелин А.В., Воронов С.А., Гальпер А.М., Колдобский С.А. Измерение суммарного спектра электронов и позитронов в эксперименте ПАМЕЛА с помощью позиционно-чувствительного калориметра и нейтронного детектора в диапазоне энергий 300–1500 ГэВ // Ядерная физика. 2015. Т. 78. № 3. С. 307–318.
20. Горбунов С.А., Волков А.Е., Жуков К.И., Коновалова Н.С., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Щедрина Т.В. Трековая методика в современной физике атомного ядра и элементарных частиц, астрофизике и нанотехнологиях // Успехи физических наук. 2024. Т. 194. № 8. С. 826–852.
21. Елиа В.В., Королёв М.Г., Дементьев Д.В., Иголкин С.Н., Сухов Н.В., Шереметьев А.Д., Шитенков М.О., Воронин А.Л., Мурин Ю.А. Устройство для сборки супермодулей кремниевой трековой системы эксперимента BM@N // Письма в ЭЧАЯ. 2024.
22. Дементьев Д.В., Шитенков М.О., Харламов П.И., Воронин А.Л., Меркин М.М., Мурин Ю.А. Пучковые испытания прототипа системы обработки данных кремниевой трековой системы эксперимента BM@N // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 1. С. 33–40.
23. Бабкин В.А., Бузин С.Г., Бурдыко А.С. и др. Исследование прототипа многоазорной резистивной плоской камеры с коротким стрипом и аналоговым считыванием // Вестник Международного университета природы, общества и человека "Дубна". 2019. № 3. С. 9
24. Бабкин В.А., Волгин С.В., Воскобойник В.И., Головатюк В.М., Лобастов С.П. Время пролетная система многоцелевого детектора MPD // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75, № 9. С. 1352–1353.
25. Бабкин В.А., Бузин С.Г., Бурдыко А.С., Буряков М.Г., Головатюк В.М., Дарибаева А., Дмитриев А.В., Дубинчик Б.В., Дулов П.О., Зайцев А.А., Колесников Р.Ю., Малахов А.И., Румянцев М.М. Время-пролетная система идентификации частиц в эксперименте NA61/SHINE в ЦЕРН // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 22, Вып. 6.
26. Тант Зин, Кадилин В.В., Деденко Г.Л. Расчетное моделирование эффективности регистрации нейтронного детектора гамма-телескопа "Гамма-400" // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. №1. С. 83.
27. Гальпер А. М., Каплин В. А., Леонов А. А., Наумов П. П., Наумов П. Ю., Рунцо М. Ф., Федотов С. Н., Хеймиц М. Д., Шарапов М. П., Юркин Ю. Т. Методика регистрации гамма-излучения с энергией более 50 ГэВ космическим гамма-телескопом // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. №3. С. 257–263.
28. Гальпер А.М., Адриани О., Аптекарь Р.Л.и др. Характеристики гамма-телескопа Гамма-400 для поиска следов темной материи // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. №11. С. 1605.
29. Роденко С.А., Майоров А.Г., Малахов В.В. Регистрация антипротонов в радиационном поясе Земли в эксперименте Памела // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. №4. С. 470–471.
30. Панасенко Л.А. Изучение широких атмосферных ливней с помощью мюонных счетчиков обсерватории Taiga // МНСК-2021. Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2021. С. 240.
31. Астапов И.И., Барбашина Н.С., Богданов А.Г. и др. Прототип установки Taiga-Hiscore: статус и первые результаты // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2017. №4. С. 495–498.
32. Лагутин А.А., Волков Н.В., Ревякин А.И. Температурный эффект пространственного распределения... электронной компоненты ШАЛ сцинтилляционных детекторов установки Тунка-Гранде // Известия Алтайского государственного университета. 2024. №1. С. 30–36.
33. Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н., Кузьмичев Л.А., Сулаков В.П., Фомин Ю.А. Возможности сцинтилляционного эксперимента Tunka-Grande в изучении массового состава первичных космических лучей // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2015. №2. С. 80–84.
34. Устинов В.В., Афанасьев С.В., Васков В.А.и др. Разработка детекторов нейтронов для спектрометра SKAN-3 в ОИЯИ // Труды МФТИ. Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). 2021. №3. С. 122–132.
35. Аневский С.И., Золотаревский Ю.М., Иванов В.С., Крутиков В.Н., Минаева О.А., Минаев Р.В. Спектрорадиометрия ультрафиолетового излучения // Измерительная техника. 2015. №11. С. 26–30.
36. Andreev D.V., Kornev S.A., Andreev V.V. Change in the Charge State of MOS Structures under Radiation and High-Field Injection at a Constant Voltage // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 2025, Vol.19. pp.324–328.
37. Kuznetsov V., Andreev D.V., Andreev V.V., Piskunov S., Popov A.I. The Compact Model Synthesis for the RADFET Device // Technologies. 2025. Vol.13. pp.492(1–18).
38. Венко Д., Варга А., Гудкова Е.Н., Нестерова Н.М., Эрдеш Г. Поиск источников первичного космического излучения при энергиях свыше 10<sup>14</sup> эВ // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2011. №5. С. 3–10.
39. Пятовский С.Е. Источники первичного космического излучения про энергии около 100 ПэВ // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2024. №1. С. 11–21.
40. Самойлов А.С., Ушаков И.Б., Шуршаков В.А. Радиационное воздействие в орбитальных и межпланетных космических полётах мониторинг и защита // Экология человека. 2019. №1. С. 4–9.
41. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Липунов В.М. и др. Группировка малых спутников Универсат-СОКРАТ для мониторинга техногенных и природных космических угроз // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. №1. С. 94–108.
42. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Калегаяев В.В. и др. Многоспутниковый оперативный мониторинг околоземной радиации в рамках проекта «Универсат-СОКРАТ» // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2018. №6. С. 104–111.
43. Головкин В. А., Пахомов Л. А., Успенский А. Б. Исследование поля уходящего излучения Земли с помощью сканирующего радиометра радиационного баланса на российских спутниках серии «Метеор» и «Ресурс» // Исследовано в России. 2003. С. 1280–1299.
44. Акулинин А., Смыков В. Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации // Проблемы региональной энергетики. 2008. №1. С. 29–39.
45. Дел Корто Барадел, Дугин Д. А. Микроспутник слежения за солнечной активностью // Труды МАИ. 2012. №51. С. 1–20.
46. Михайлов В. В., Адриани О., Базилевская Г. А., Барбарин Дж., Велотти Ф. и др. Вторичные позитроны и электроны в околоземном космическом пространстве по данным эксперимента PAMELA // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 2. С. 222–224.
47. Горячева В. С., Воронов С. А., Михайлов В. В. Поиск солнечных нейтронов по данным нейтронного детектора спектрометра PAMELA // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2016. Т. 43, № 10. С. 32–37.

48. Casolino M., Picozza P., Altamura F. etc. Launch of the space experiment PAMELA // *Advances in Space Research*. 2008. Vol. 42. P. 455-466.
49. Mocchiutti E., Adriani O., Barbarino G. C. etc. Results from PAMELA // *Nuclear Physics B. Proceedings Supplements*. 2011. pp. 243-248.
50. Adriani O., Barbarino G. C., Bazilevskaya G. A. etc. The PAMELA experiment: a decade of Cosmic Ray Physics in space // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 798. – Art. 012033.
51. Воронин Д. М. Разработка и создание калибровочных систем для экспериментов в астрофизике частиц: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2024.
52. Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P. etc. TAIGA – a hybrid array for high energy gamma astronomy and cosmic ray physics // *EPJ Web of Conferences*. 2018. Vol. 191. Art. 01007.
53. Иванов А. А., Кнуренко С. П., Слепцов И. Е., Сабуров А. В. Оценка энергии электронно-фотонной компоненты космических лучей по измерению черенковского света широких атмосферных ливней сверхвысоких энергий // *Письма в ЖЭТФ*, том 83, вып. 11, с. 563-567.
54. Ivanov A. (for the Yakutsk array group). The Yakutsk array experiment: Main results and future directions // *EPJ Web of Conferences*. – 2013. – Vol. 53. – 04003.
55. Иванов А. А., Кнуренко С. П., Правдин М. И., Слепцов И. Е. Основные результаты исследования космических лучей сверхвысоких энергий на Якутской установке ШАЛ // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2010. № 4. С. 56.
56. Вострухин А. А., Головин Д. В., Козырев А. С. и др. Микрофонный эффект в сцинтилляционном гамма-спектрометре в условиях вибрационных воздействий на борту космического аппарата // *Космическая техника и технологии*. 2017. №1. С. 82-88.
57. Деменков В. Г., Деменков П. В. Начала электронных методов ядерной физики. – СПб.: Лань, 2016. – 384 с.
58. Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г. Современные материалы в конструкции датчиков для аэрокосмических аппаратов // *Надежность и качество сложных систем*. 2020. №1. С. 84-90.
59. Недосекин П. Г. Исследование и разработка сенсора на основе монокристаллического алмаза для измерения радиационных потоков космического излучения: дис. канд. техн. наук: Москва, 2021. – 166 с.
60. Шумаков А. В., Свиридов А. С. Современные детекторы для радиационных мониторов // *Атомная энергия*. 2011. №3. С. 154-163.
61. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Andreev D.V., Stolyarov A.A. Use of MIS Sensors of Radiation in High-Field Electron Injection Modes // *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*. 2020. Vol. 55. No. 2. P. 144-150.
62. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V. Change in the Charge State of MOS Structures with a Radiation-Induced Charge under High-Field Injection of Electrons // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2023. Vol.17. No.1. P. 48-53.
63. Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices // *Technologies*, 2024, Vol.12, P.102(1-10).
64. Бардик Э. Р., Власов А. И., Киселев П. Д., Селиванов К. В. Визуальное системное проектирование комплексов предиктивной аналитики в энергетике // *Труды международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2024. Т. 2. С. 91-102.
65. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 2 (22). С. 26-35.
66. Власов А. И., Волынкина М. М., Широков Д. Е., Юдин А. В. Использование визуальных языков при разработке интегрированной системы контроля и передачи полетной информации // *XLIX Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. В 2-х томах*. – Москва, 2025. С. 163-164.
67. Власов А. И., Волынкина М. М., Широков Д. Е., Юдин А. В. Визуальные методы и средства системного проектирования интегрированного комплекса контроля и передачи полетной информации // *Теория и реализация информационных систем. Сборник статей I международной научной конференции*. – Москва, 2025. С. 89-92.

УДК 629.78

**Зинкин<sup>1</sup> С.В., Тасимов<sup>2</sup> В.Е.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> stratarts@yandex.ru

<sup>2</sup> tasimchuk@gmail.ru

### **АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ АНТЕНН ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**

**Аннотация.** Распространение получили параболические зеркальные антенны – однозеркальные и двухзеркальные. Формирование диаграммы направленности антенны в таких антеннах происходит в результате отражения электромагнитных волн, излучаемых облучателем от металлической поверхности специального рефлектора (зеркала). Для размеров раскрытия зеркала, значительно больших длин волны, и при хорошей проводимости поверхности рефлектора можно считать, что радиоволны от облучателя, падающие на рефлектор, отражаются от него по законам геометрической оптики. Еще один широкоприменяемый тип антенны в виде системы из большого числа слабонаправленных излучателей, называются решётками. Принцип действия таких антенн может быть пояснен на примере линейной эквидистантной решётки из  $N$  излучателей, расположенных на равных расстояниях друг от друга и питаемых токами равной амплитуды. Поле такой решётки в любой точке пространства образуется в результате наложения полей, создаваемых каждым излучателем в отдельности. Результирующая амплитуда поля в точке наблюдения будет зависеть от амплитуд и фаз питающих токов и расстояния от каждого излучателя до точки наблюдения. Максимум напряжённости электромагнитного поля оказывается в том направлении, в котором поля отдельных излучателей будут синфазными. Это обстоятельство и лежит в основе формирования диаграммы направленности антенной решётки. Проанализированы особенности функционирования рассмотренных типов антенн.

**Ключевые слова:** антенна земной станции спутниковой связи, зеркальная антенна, антенная решетка

**Zinkin<sup>1</sup> S.V., Tasimov<sup>2</sup> V.E.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> stratarts@yandex.ru

<sup>2</sup> tasimchuk@gmail.ru

### **ANALYSIS OF SATELLITE COMMUNICATION TERMINAL STATION ANTENNAS**

**Abstract.** Parabolic mirror antennas, such as single-mirror and double-mirror antennas, have become widespread. In these antennas, the antenna's radiation pattern is formed by reflecting the electromagnetic waves emitted by the radiator onto the metal surface of a special reflector (mirror). For mirror sizes that are significantly larger than the wavelength, and with good conductivity of the reflector surface, it can be assumed that the radio waves from the radiator that fall on the reflector are reflected according to the laws of geometric optics. Another widely used type of antenna is a system of a large number of weakly directional emitters, called arrays. The principle of operation of such antennas can be explained using the example of a linear equidistant array of  $N$  emitters, which are located at equal distances from each other and are powered by currents of equal amplitude. The field of such a lattice at any point in space is formed as a result of the superposition of the fields created by each individual radiator. The resulting amplitude of the field at the observation point will depend on the amplitudes and phases of the supply currents and the distance from each radiator to the observation point. The maximum intensity of the electromagnetic field occurs in the direction where the fields of the individual radiators are in phase. This fact is the basis for the formation of the antenna array's radiation pattern. The article analyzes the features of the functioning of the antennas discussed.

**Keywords:** satellite communication ground station antenna, mirror antenna, antenna array

В настоящее время используются разные типы антенн для земных станций спутниковой связи в зависимости от их применения. В статье рассмотрены основные типы антенн.

#### **Зеркальные антенны**

Широкое распространение получили параболические зеркальные антенны. Формирование диаграммы направленности антенны (ДНА) в таких антеннах происходит в результате отражения электромагнитных волн, излучаемых облучателем от металлической поверхности специального рефлектора (зеркала). Для размеров раскрытия зеркала, значительно больших длин волны, и при хорошей проводимости поверхности рефлектора можно считать, что радиоволны от облучателя, падающие на рефлектор, отражаются от него по законам геометрической оптики [1]. Наиболее простой из параболических зеркальных антенн является однозеркальная антенна. Принцип излучения электромагнитной энергии очевиден из рисунка 1, а. При приёме энергии электромагнитных волн она отражается от зеркала и собирается в фокусе  $F$ , где установлен облучатель. От него энергия сигнала поступает к приёмнику по фидеру.

Основным свойством зеркала является то, что при помещении в его фокусе  $F$  облучателя, излучающего сферическую волну, в раскрытие зеркала получается волна с плоским фронтом (синфазный раскрыт). Электромагнитное поле в раскрытии зеркала, создаваемое облучателем, должно быть по возможности равномерным и быстро спадающим за его пределами. При малом фокусном расстоянии, что соответствует глубокому зеркалу, почти вся энергия облучателя попадает на зеркало, но края его облучаются небольшим полем и оно, отражаясь, вносит небольшой вклад в формирование ДНА, что эквивалентно понижению коэффициента использования поверхности

зеркала. При большом фокусном расстоянии, что характерно для мелкого зеркала, поле получается более равномерным, но значительная часть его энергии не попадает на рефлектор. Оптимальному значению фокусного расстояния соответствует ослабление поля на краях раскрыва по сравнению с полем в центре на 10-15 дБ (3,16-4 раза). Оно обычно определяется диаметром зеркала и видом ДНА облучателя [2].

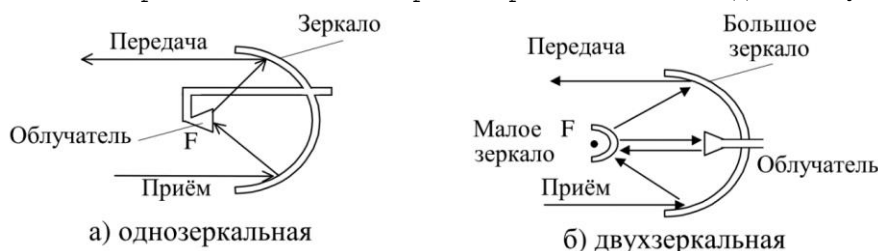


Рисунок 1 – Схемы зеркальных антенн

В качестве облучателей в однозеркальных антеннах применяются главным образом волноводно-рупорные и спиральные облучатели. Волноводно-рупорные облучатели представляют собой либо открытый конец волновода, либо небольшой рупор, подсоединённый к концу волновода. Последний предпочтителен для получения более равномерного облучения зеркала, а также уменьшения нежелательных явлений в виде паразитной поляризации (кросс-поляризация), снижающей коэффициент усиления антенны.

Спиральные облучатели представляют собой по существу спиральные антенны, выполненные в виде конуса или цилиндра. Конические спирали позволяют расширить диапазон рабочих частот, причём диапазонность антенны определяется размерами максимального и минимального диаметров витков спирали. Конструкция спиральных облучателей может быть различной. Обычно спиральный облучатель состоит из двух спиральных антенн, причём внешняя коническая спираль используется в режиме приёма, а внутренняя цилиндрическая – в режиме передачи. Цилиндрическая спираль намотана на пенопластовый цилиндр и расположена внутри конической спирали.

Для уменьшения рассеивания энергии облучатель имеет экран рефлектор, к которому крепятся волновод и коаксиальный фидер, подсоединённые к соответствующим спиральям. В некоторых антеннах в качестве облучателя используется двухзаходовая коническая логопериодическая спиральная антенна.

Применение спиральных облучателей позволяет получать круговую поляризацию электромагнитного поля всей антенны как в режиме излучения, так и приёма, что исключает необходимость обеспечения жёсткой стабилизации пространственного положения антенны спутника-ретранслятора при линейной или квазилинейной поляризации. Использование спиралей в качестве облучателя уменьшает затенение зеркала по сравнению с рупорными облучателями [3].

Однозеркальные антенны, несмотря на простоту конструкции, обладают сравнительно высокой шумовой температурой. Это объясняется тем, что при ориентации антенны на спутник облучатель направлен в сторону Земли и шумы Земли через облучатель непосредственно поступают на вход приёмника. Кроме того, в однозеркальных антеннах фидер, идущий от облучателя ко входу приёмного устройства, имеет значительную длину, и чем больше размеры антенны, тем длиннее фидер, и соответственно будет выше шумовая температура за счёт роста затухания в фидере.

Существенного уменьшения шумовой температуры антенны можно добиться за счёт усовершенствования её системы облучения. Для этого собственно облучатель смещается к поверхности зеркала, что сокращает длину фидера, а в точку фокуса помещают контррефлектор (малое зеркало). В результате получается двухзеркальная антенна, которая показана на рисунке 1,б.

Роль малого зеркала в основном сводится к изменению направления волны облучателя. В результате направление излучения основного зеркала и облучателя получается в одном направлении и направлено в сторону от Земли в отличие от однозеркальных антенн, в которых излучение зеркала и облучателя встречное, а облучатель направлен в сторону Земли. В итоге удаётся снизить уровень шумов Земли. Кроме того, при заданной форме ДНА облучателя в двухзеркальной антенне удаётся обеспечить необходимое амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве основного зеркала, что позволяет получать узкую ДНА антенны при малом уровне боковых лепестков. Двухзеркальная антенна впервые была осуществлена в оптическом телескопе Кассегрена. Позже по этому принципу стали конструировать антенны.

Форма малого зеркала и его положение выбираются такими, чтобы отражённая волна была сферической с центром в фокусе основного зеркала. В антеннах Кассегрена малое зеркало представляет собой гиперboloид вращения. Встречаются антенны, в которых малое зеркало выполнено в виде эллипсоида. Такие антенны



относят к антеннам, выполненным по схеме Григори. Наибольшее распространение получили антенны Кассегрена.

Малое зеркало в некоторой степени затеняет основное зеркало, что уменьшает эффективную площадь антенны и соответственно коэффициент усиления антенны. Уменьшение этого эффекта может быть достигнуто как подбором размеров малого и большого основного зеркала, так и их фокусных расстояний. На практике величину диаметра малого зеркала  $D_m$  выбирают из условия, что  $D_m \leq (0,1...0,25)D_0$ , где  $D_0$  – диаметр основного зеркала. При соотношении  $f_m/f_0 \approx D_m/D_0$ , где  $f_m$  и  $f_0$  – фокусные расстояния малого и основного зеркала соответственно, затенение становится равным затенению, создаваемому облучателем в однозеркальной антенне [4].

Коэффициент усиления параболической антенны зависит от размеров основного зеркала и определяется выражением:

$$G = \frac{4\pi q S_A}{\lambda^2} \eta, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $S_A$  – площадь раскрытия антенны;  $q$  – коэффициент использования площади антенны (обычно 0,5–0,6);  $\eta$  – КПД антенны (обычно близок к единице).

Выражая площадь раскрытия антенны через диаметр  $D$ , получим:

$$G = \frac{4\pi^2 D^2}{\lambda^2} \eta. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет определить максимальное значение  $G$  в направлении главного лепестка ДНА при условии равномерного распределения поля на раскрытии, т.е.  $q = 1$ .

Ширина основного лепестка ДНА антенны, также как и её коэффициент усиления, зависит от размеров большого зеркала и длины волны, используемой для передачи и приёма соответственно. Зависимость ширины ДНА антенны  $\theta^\circ$  от её диаметра и длины волны  $\lambda$  на уровне половинной мощности определяется приближенной формулой:  $\theta^\circ \approx (65 \div 70) \lambda / D$ .

#### Антенные решетки

Перспективными типами антенн земных станций спутниковой связи являются антенны в виде системы из большого числа слабонаправленных излучателей, называемые решётками. В качестве излучателей могут быть использованы, например, симметричные вибраторы, открытые концы волноводов или рупоры, щели, диэлектрические и спиральные антенны и др.

Принцип действия таких антенн может быть пояснён на примере (рисунок 2) линейной эквидистантной решётки из  $N$  излучателей, расположенных на равных расстояниях друг от друга и питаемых токами равной амплитуды [5].

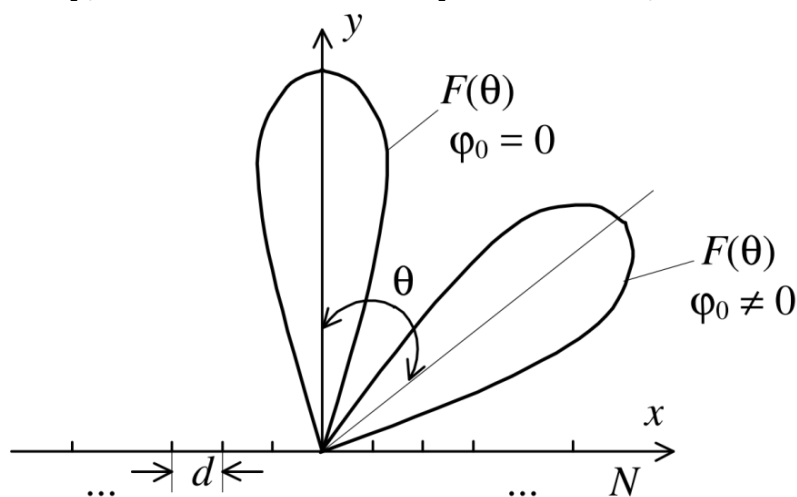


Рисунок 2 – Диаграмма управления ДНА фазированной антенной решётки в одной плоскости

Поле такой решётки в любой точке пространства образуется в результате наложения полей, создаваемых каждым излучателем в отдельности. Результирующая амплитуда поля в точке наблюдения будет зависеть от амплитуд и фаз питающих токов и расстояния от каждого излучателя до точки наблюдения. Максимум напряжённости электромагнитного поля оказывается в том направлении, в котором поля отдельных излучателей будут синфазными. Это обстоятельство и лежит в основе формирования диаграммы направленности антенной решётки (ДН АР)  $F(\theta)$ . ДНА АР зависит от ДНА каждого излучателя  $F_i(\theta)$ , от числа элементов решётки  $N$ , расстояния  $d$  между ними, закона распределения амплитуд и фаз токов в излучателях и определяется формулой:

$$F(\theta) = F_i(\theta) F_N(\theta), \quad (3)$$

где  $F_N(\theta)$  – множитель системы (решётки) излучателей.

Если все излучатели антенной решётки питаются одинаковыми по амплитуде токами со сдвигом по фазе  $\varphi_0$ , то множитель решётки описывается выражением:

$$F_N(\theta) = \frac{\sin[0,5N(kd \sin \theta - \varphi_0)]}{N \sin[0,5N(kd \sin \theta - \varphi_0)]}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол между направлением на точку наблюдения и нормалью к оси решётки;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число в свободном пространстве [6].

Нетрудно убедиться, что множитель решётки имеет несколько дополнительных максимумов, а это свидетельствует о наличии в диаграмме направленности, кроме основного, боковых лепестков. При достаточно большом значении  $N$  ДНА АР определяется главным образом множителем АР.

Из (4) следует, что максимум основного лепестка ДНА АР ориентирован в направлении, при котором фазовый сдвиг между полями соседних излучателей обращается в нуль, т.е. при

$$kd \sin \theta - \varphi_0 = 0, \quad (5)$$

а угол основного лепестка относительно нормали, как следует из условия (5), будет равен

$$\theta = \arcsin \varphi_0 / (kd) = \arcsin (\lambda \varphi_0) / (2\pi d). \quad (6)$$

Из последней формулы очевидно, что изменение углового положения ДНА АР может быть осуществлено путём изменения фаз  $\varphi_0$  токов, питающих соседние элементы излучателей. Антенные решётки, пространственное положение основного лепестка которых зависит от изменения фаз распределения поля на раскрыве, называют фазированными антенными решётками (ФАР).

Для изменения фазовых сдвигов могут применяться механические, ферритовые и полупроводниковые фазовращатели. Последние два типа фазовращателей позволяют осуществлять практически безынерционное электронное управление сдвигом фаз. Фазовращатели включаются в линии питания излучателей.

Формирование управляемой ДНА АР в двух плоскостях осуществляется поверхностными решётками (рисунок 3). Управление ДНА в пространстве достигается путём сдвига фаз вдоль оси  $X$  (смещение по азимуту) и вдоль оси  $Y$  (смещение по углу места).

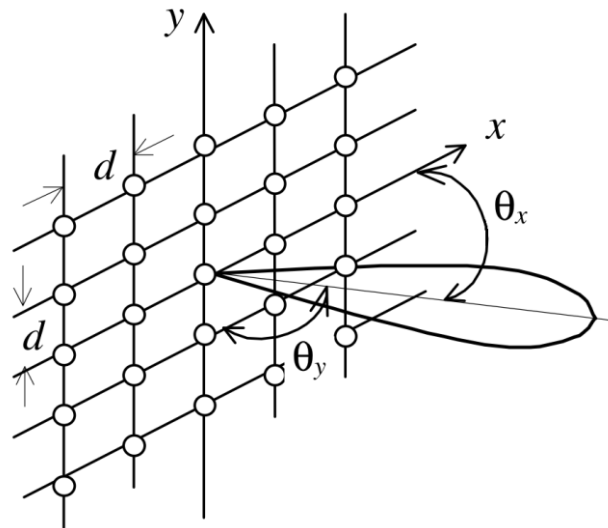


Рисунок 3 – Диаграмма управления ДНА ФАР в одной плоскости

Особенностью ФАР является то, что ширина ДНА основного лепестка не остаётся постоянной при отклонении от нормали к линии излучателей [7]. Когда главный максимум ДНА перпендикулярен к линии излучателей, то ширина ДНА ФАР на уровне половинной мощности равна.

$$\theta \approx 0,9\lambda / Nd, \text{ рад.} \quad (7)$$

При отклонении ДНА от нормали ширина её увеличивается примерно обратно пропорционально косинусу угла отклонения. Одновременно с этим возрастают боковые лепестки ДНА антенны. Снижения уровня бокового излучения можно добиться неэквидистантным (например, по случайному закону) размещением излучателей в решётке или неравномерным амплитудным распределением.

Как уже отмечалось, в ФАР наряду с основным могут возникать дополнительные максимумы. Для существенного уменьшения дополнительных дифракционных максимумов расстояние между соседними излучателями не должно превышать  $\lambda/2$ . Это условие приводит к тому, что для формирования остронаправленных диаграмм требуется большое количество излучателей и управляющих устройств. Соблюдение последних требований сопряжено с рядом трудностей как конструктивного, так и стоимостного характера.

Уменьшение числа излучателей при сохранении заданной ширины ДНА можно достичь за счёт использования направленных излучателей. Однако в этом случае сокращается возможный сектор сканирования антенного луча. Так, если при слабонаправленных излучателях сектор сканирования может достигать  $\pm 45^\circ$ , то при направленных излучателях он определяется шириной ДНА антенны.

Управление положением ДНА ФАР может быть плавным и дискретным. Последнее нашло широкое применение в виду более простой схемной реализации.

ФАР имеют ряд достоинств по сравнению с зеркальными антеннами. К ним относятся: малый вес, отсутствие сложных и громоздких опорно-поворотных устройств, возможность получения большой скорости перемещения антенного луча, а также возможность формирования нескольких независимых управляемых лучей. Последняя возможность заключена в независимом управлении по апертуре амплитудой и фазой тока излучателей [8].

Однако ФАР имеют недостатки, которые ограничивают их широкое применение в станциях спутниковой связи. К таким недостаткам относятся: сложность технологии изготовления ФАР и соответственно высокая их стоимость, трудность получения большого коэффициента усиления, узкополосность, относительно высокий уровень боковых лепестков и повышенный уровень шумов.

Стремление увеличить получаемую мощность, уменьшить тепловые потери, повысить надёжность ФАР способствовало появлению активных фазированных антенных решёток (АФАР). Особенностью АФАР является многоэлементная антенна, в тракт каждого излучателя которой в зависимости от назначения антенны включен активный элемент: передатчик, малошумящий усилитель, преобразователь частоты. Активные элементы располагаются в непосредственной близости от излучателей или встраиваются в них. АФАР выполняются по модульному принципу. При этом модуль представляет собой совокупность излучателя, активного элемента и элементов управления. При выходе из строя одного или нескольких модулей характеристики АФАР (коэффициент усиления, диаграмма направленности) изменяются незначительно, что свидетельствует о высокой надёжности антенны.

В активном варианте могут быть выполнены передающие, приёмные, а также приёмопередающие АФАР. В качестве примера на рисунке 4 изображена схема приёмной АФАР. За счёт включения малошумящего усилителя (МШУ) после полосового фильтра (ПФ), осуществляющего частотную селекцию полезного сигнала, приёмные АФАР имеют меньший уровень шума. Для управления фазой фазовращатели (ФВ) размещаются на выходе МШУ. Схема питания (СхП), например, фидерного типа обеспечивает подведение энергии, принимаемой отдельными модулями, к входу приёмника земной станции [9-10].

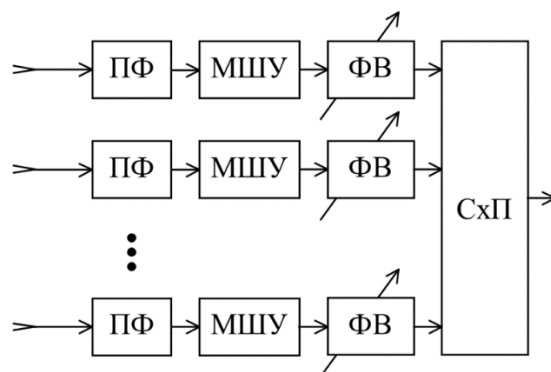


Рисунок 4 – Структурная схема

Преимуществом передающих АФАР является отсутствие общего тракта, по которому передаётся суммарная мощность. Сложение мощностей передатчиков АФАР осуществляется в пространстве. Для обеспечения когерентности колебаний во всех передатчиках они синхронизируются с помощью задающего генератора. Управление фазой в передающих АФАР производится фазовращателями, включёнными в тракты с малым уровнем мощности, например на входе передатчиков, или в их предварительных каскадах усиления [11-13]. При этом снижаются потери, вносимые фазовращателями.

Таким образом, основным требованием к антеннам земных станций является обеспечение необходимого энергетического потенциала линий спутниковой связи при сохранении основных качественных показателей: помехозащищённости, разведзащищённости, точности наведения, защищённости от поражающих факторов обычного и ядерного оружия и т.д. При этом основные исследования в области антенных систем для земных станций направлены на создание:

- простых антенн с фиксированным лучом для связи через один геостационарный спутник-ретранслятор;

- зеркальных антенн с электромеханическим управлением для работы через различные спутники-ретрансляторы;
- антенных решёток с электронным сканированием, для работы через различные спутники-ретрансляторы в сочетании с высокими требованиями по оперативности перехода с одного спутника-ретранслятора на другой.

При относительно медленных угловых перемещениях ИСЗ на высокоэллиптических орбитах их сопровождение обеспечивается с высокой точностью стационарными земными станциями, использующими зеркальные антенны с электромеханическим управлением ДНА. В этом случае не составляет особых трудностей создание мощных опорно-поворотных устройств. Однако эта задача существенно усложняется для мобильных станций спутниковой связи (например, на кораблях или самолётах), в условиях сложной помеховой обстановки, а также для корреспондентов (в том числе и стационарных) низкоорбитальных систем спутниковой связи. В этих условиях целесообразно применять АФАР с электронным сканированием.

Успехи в разработке твёрдотельных усилителей мощности, работающих на частотах до 20 ГГц и имеющих достаточное время наработки на отказ, обусловили создание многофункциональных спутниковых АФАР, позволяющих снизить массу и габариты аппаратуры, улучшив её технологичность с одновременным увеличением пропускной способности и возможностью управления характеристиками системы связи.

В статье проведен теоретический анализ применяемых антенн в земных станциях спутниковой связи, а именно: однозеркальные и двухзеркальные антенны, антенные решетки. Акцентировано внимание на особенности функционирования каждой из рассмотренных антенн земных станций спутниковой связи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Локшин Б.А. Негеостационарные системы фиксированной спутниковой связи – состояние и перспективы развития // Электросвязь. – 2018. № 2. – С. 30-39.
2. Основы построения систем спутниковой связи: учебник / Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. / Под ред. Немировского М.С. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 432 с.
3. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учебное пособие. Часть 1. – Таганрог: ТРТУ, 2004. – 95 с.
4. Проценко Е.Б., Квашнин А.А., Мочалов Д.А. Анализ методов проведения испытаний высокочастотных характеристик связных полезных нагрузок // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: сб. тезисов IV на-уч.-техн. конф. молодых специалистов. АО «ИСС», 2017. – С. 19-21.
5. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой: монография / Камнев Е.Ф., Аболиц А.И. и др. / под ред. Е.Ф. Камнева. – М.: Глобсатком. 2009. – 723 с.
6. Степанов А., Акимов А., Гриценко А., Чазов В. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи / Технологии и средства связи. Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание-2016". – С. 72-87.
7. Анисимов А.Г., Трусов В.А., Тюрин С.А., Жихарев К.В., Сулейменов Е.А. Обзор зеркальных параболических антенн // Труды международного симпозиума "Надежность и Качество". 2017. Том 1. – С. 146-147.
8. Системы космической связи: учебник / В.Ю. Алфеев, В.В. Артюшин, В.А. Григорьев и др. / Под ред. Е.Н. Косякова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – 346 с.
9. Huang J., Cao J. (2020) Recent Development of Commercial Satellite Communications Systems. In: Liang Q., Wang W., Mu J., Liu X., Na Z., Chen B. (eds) Artificial Intelligence in China. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 572. Springer, Singapore.
10. Louis J. Ippolito Jr. Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance, Second Edition. Published 2017 by John Wiley & Sons Ltd. 458 p.
11. Pelton J.N. (2017) Global Communications Satellite Systems. In: Pelton J., Madry S., Camacho-Lara S. (eds) Handbook of Satellite Applications. Second Edition. Springer, Cham. 1557 p.
12. Якимов А.Н. Особенности триангуляции излучающей поверхности антенны методом построчно-растрового сканирования // Труды международного симпозиума "Надежность и качество", Том 1, 2021. – С. 21-25.
13. Баранов С.А., Овчинников Д.А. Повышение эффективности излучения сверхширокополосных антенн круговой поляризации // Труды международного симпозиума "Надежность и качество", Том 2, 2020. – С. 41-45.

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ**

**Аннотация.** Рассматриваются особенности расчета и проектирования спутниковых систем передачи. Гипотетическая эталонная цепь для цифровых систем передачи (цифровой тракт) состоит из одной линии вверх и одной вниз, космический сегмент которой может включать одну или несколько линий «спутник – спутник». В состав цифрового тракта входит также и оборудование, необходимое для соединения его с сетью наземных линий на уровнях первичного объединения. Каналообразующая аппаратура и наземные линии, соединяющие земные станции с узлами связи, в состав цепи (тракта) не входят. В спутниковых системах с частотным разделением (наиболее распространенные) каналов с частной модуляцией среднeminутная психофотометрическая мощность шума в канале тональной частоты не должна превышать 10 тыс. пВт психоф в течение более чем 20% и 50 тыс. пВт психоф в течение более чем 0,3% времени любого месяца. Невзвешенная мощность шума (при времени интеграции 5 мс) может превышать 106 пВт психоф не более чем 0,01% времени любого года. Эти величины включают и шумы, вызванные мешающими сигналами. Проведен теоретический расчет энергетических параметров участков передачи цифрового тракта, указано, на что необходимо обратить внимание при вычислениях.

**Ключевые слова:** спутниковая система передачи, многостанционный доступ, затухание

**Zinkin<sup>1</sup> S.V.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> stratarts@yandex.ru

## **FEATURES OF CALCULATION AND DESIGN OF SATELLITE TRANSMISSION SYSTEMS**

**Abstract.** Features of calculation and design of satellite transmission systems are considered. Hypothetical reference circuit for digital transmission systems digital path for consist of one line up and one down, the space segment of which may include one or more lines satellite-satellite. The digital path also includes the equipment necessary for connecting it with the network of ground lines at the levels of primary association. The channel-forming equipment and ground lines connecting terrestrial stations with communication nodes are not included in the circuit (path). In satellite systems with frequency division (the most common), the average minute psophometric noise power in the tone frequency channel must not exceed 10,000 pW psoph for more than 20% of the time and 50,000 pW psoph for more than 0.3% of the time in any month. The unweighted noise power (with an integration time of 5 ms) may exceed 106 pW psoph for no more than 0.01% of the time in any year. These values include noise caused by interfering signals. A theoretical calculation of the energy parameters of the digital path sections has been performed, and it has been indicated what needs to be taken into account during the calculations.

**Keywords:** satellite transmission system, multi-station access, attenuation

Полагая, что орбита, способ многостанционного доступа (МД) и назначение каналов, а также диапазон рабочих частот заданы, остановимся на расчете спутниковой линии связи. Гипотетическая эталонная цепь для цифровых систем передачи цифровой тракт для состоят из одной линии вверх и одной вниз, космический сегмент которой может включать одну или несколько линий спутник – спутник. В состав цифрового тракта входит также и оборудование, необходимое для соединения его с сетью наземных линий на уровнях первичного объединения. Каналообразующая аппаратура и наземные линии, соединяющие земных станций (ЗС) с узлами связи, в состав цепи (тракта) не входят. Расстояния между ЗС гипотетической цепи или тракта не определены [1-3].

В спутниковых системах с ЧРК-ЧМ (частотное разделение каналов с частной модуляцией) среднeminутная психофотометрическая мощность шума в канале тональной частоты (ТЧ) не должна превышать 10 тысяч пВт психоф в течение более чем 20% и 50 тысяч пВт психоф более чем 0,3% времени любого месяца. Невзвешенная мощность шума (при времени интеграции 5 мс) может превышать 10<sup>6</sup> пВт психоф не более чем 0,01% времени любого года. Эти величины включают и шумы, вызванные мешающими сигналами.

При передаче цифрового (аналогового) ТВ сигнала с помощью ЧМ отношение квадратов напряжения размаха сигнала и визометрического напряжения шумов на выходе канала при использовании унифицированного взвешивающего фильтра должно быть не менее 53 дБ в течение 99% и не менее 46 дБ в течение 99,9% времени любого месяца. В системах с использованием цифровых методов передачи телефонных сигналов средняя за 10 мин частота ошибок не должна превышать 10<sup>-6</sup> в течение более чем 20%, а средняя за одну минуту 10<sup>-4</sup> более чем 0,3% времени любого месяца; средняя за одну секунду частота ошибок не должна превышать 10<sup>-3</sup> более чем 0,01% времени любого года.

Расчет спутниковых систем передачи (ССП) сводится к обеспечению необходимых отношений сигнал-шум на входе приемников ретранслятора и ЗС, при которых обеспечивается выполнение нормы на шумы в каналах аналоговых систем и на допустимую вероятность ошибочного приема в цифровых. В системах с ЧРК по нормам в течение

20% времени любого месяца суммарные шумы в канале ТЧ могут превышать 110 тысяч пВт псоф. Из этой нормы отводится 1000 пВт псоф на помехи, создаваемые радиотелевизионными системами передачи (РРС), и 2000 пВт псоф на помехи от соседних ССП. Переходные помехи в канале ТЧ, обусловленные нелинейностями в модемах и высокочастотном (ВЧ) тракте, обычно принимают равными 2000 пВт псоф. Отсюда на тепловые шумы остается  $P_{т.доп} = 5000$  пВт псоф [4,5].

Для ТВ каналов отношение сигнал-шум в канале в течение 99% времени любого месяца должно быть более 53 дБ. Поскольку шумы аппаратуры в ТВ каналах ССП много меньше шумов, возникающих в радиотракте, в первом приближении можно считать  $(U^2_{т}/U^2_{рс})_{доп} \approx 10^{-5,3}$ .

При передаче телефонных сообщений в цифровой форме находят значение типа  $n(t)$ , соответствующее вероятности ошибки  $10^{-6}$ . С учетом снижения помехозащищенности от межсимвольных и аппаратурных помех на входе приемника ЗС должно быть обеспечено отношение сигнал-шум

$$(P_c/P_{ш})_{доп} = 10^{0,1(n(t)+\Delta n_{м.п}+\Delta n_a)}. \quad (1)$$

При передаче сообщений методом ЧРК-ЧМ допустимое отношение  $P_c/P_{ш}$  на входе приемника ЗС можно определить на основе (2).

$$P_t = 10^9 K_{пс}^2 \frac{kT_3 \Delta F_k}{P_{с.вх} B_{п}^2 (F_k)} \left( \frac{F_r}{\Delta f_k} \right)^2. \quad (2)$$

Для этого подставим в (2)  $P_t = P_{т.доп}$  и разделим правую и левую части на мощность шумов на входе  $P_{ш} = kT_3 P_{ш}$  [6,7]. После очевидных преобразований получим

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{доп} = \frac{10^9 K_{пс}^2 \Delta F_k}{P_{т.доп} P_{ш} B_{п}^2 (F_k)} \left( \frac{F_r}{\Delta f_p} \right)^2. \quad (3)$$

Аналогично для случая передачи сигнала изображения

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{доп} = \left( \frac{U_{рс}^2}{u_t^2} \right)_{доп} \frac{K_B^2 F_B}{1,5 P_{ш}} \left( \frac{F_B}{\Delta f_p} \right)^2. \quad (4)$$

В ССП девиация частоты, в отличие от РРС, не нормируется. Её приходится определять исходя из заданной полосы пропускания радиотракта. С точки зрения снижения тепловых шумов в каналах желательно увеличивать девиацию частот  $\Delta f_k$  и  $\Delta f_p$ . Однако практически приходится считаться с необходимостью экономии полосы частот радиотракта и с наличием переходных помех [8]. Из этих соображений в диапазонах 4 и 6 ГГц полосу частот одного ствола обычно берут равной 35 ... 50 МГц. В диапазоне 12 ГГц для систем передачи ТВ вещания принята  $\Pi = 27$  МГц. Девиацию частоты можно найти исходя из известных соотношений

$$\Pi_{тф} = 2(\Delta f_{пик} + F_B) \text{ и } \Pi_{тф} = \Delta f_p + 2F_B,$$

где  $\Delta f_{пик} = \Delta f_k \cdot 10^{0,05(P_{ср}+x)}$ .

Следует заметить, что при передаче сигналов звукового сопровождения методом ЧРК на поднесущей  $F_{п}$  принимают  $F_B = F_{п}$ , а при ВРК полагают  $F_B = 6$  МГц. Для последующих расчетов положим  $P_{ш} \approx \Pi_{тф}(\tau_B)$ . Выразим допустимые значения отношения сигнал-шум на входах приемников ретранслятора и ЗС через отношение  $(P_c/P_{ш})_{доп}$  на входе демодулятора:

$$(P_c/P_{ш})_p = a_p (P_c/P_{ш})_{доп} \text{ и } (P_c/P_{ш})_з = a_з (P_c/P_{ш})_{доп}, \quad (5)$$

где коэффициенты  $a_p$  и  $a_з > 1$ . Поскольку  $(P_{ш}/P_c)_{доп} = (P_{ш}/P_c)_p + (P_{ш}/P_c)_з$ , то

$$1/a_p + 1/a_з = 1. \quad (6)$$

Обычно для участка вниз принимают  $a_з = 1,1 \dots 1,2$ , тогда для участка вверх  $a_p = 1 \dots 6$ . Подставим в (7) значение  $(P_c/P_{ш})_p = a_p (P_c/P_{ш})_{доп}$  и произведем замену  $P_{пдз} G_{пдз}/L_{пдз} = \mathcal{E}_з$  согласно (8)

$$\left( \frac{P_{ш}}{P_c} \right)_{з.с} = \frac{(4\pi)^2 r_{з-с}^2 L_{пдз} L_{пмс} k T_{с} P_{ш} a_p V_{з.с}}{P_{пд} G_{пдз} G_{пмс} \lambda_{з.с}^2}, \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_з = P'_{пд} \cdot G_{пд}. \quad (8)$$

После очевидных преобразований получим формулу для расчета эффективной изотропно излучаемой мощности (ЭИМ) ЗС

$$\mathcal{E}_з = \frac{16\pi^2 r_{з-с}^2 L_{пмс} k T_{с} P_{ш} a_p V_{з.с}^2}{G_{пмс} \lambda_{з.с}^2} (P_c/P_{ш})_{доп}. \quad (9)$$

Для ретранслятора с учетом (10) ЭИМ

$$D_з = G_{пмс}/T_{эз}, \quad (10)$$

получим

$$\mathcal{E}_з = \frac{16\pi^2 r_{з-с}^2 L_{пмс} k P_{ш} a_з V_{з.с}^2}{D \lambda_{з.с}^2} (P_c/P_{ш})_{доп}. \quad (11)$$

Для последующих расчетов по (9) и (11) необходимо знать ряд параметров спутниковой системы [9,10]. Определим их. В первую очередь  $T_{рз}$  определяется по (12):

$$T_{шз} = T_{шпмс} + T_{ш.ф} + (T_{ш.пог} + T_{ш.з}) \eta_{пмс.ф}. \quad (12)$$

Расстояния от искусственного спутника Земли (ИСЗ) до ЗС обычно принимаются равными максимальной наклонной дальности (штриховая линия на рисунке 1).

При геостационарной орбите  $r = 42164 \cdot [1 - (0,151266 \cos \beta)^2]^{1/2} - 6378 \sin \beta$ , км.

Угол возвышения  $\beta$  для наведения земной антенны на спутник, расположенный на этой орбите, определяется исходя из широты места и долготы относительно подспутниковой точки по кривым на рисунке 2. Для эллиптической орбиты  $d$  следует рассчитывать при нахождении ИСЗ в точке апогея.

Потери в атмосфере зависят от частоты и угла возвышения и могут быть найдены по кривым на рисунок 3.

Значения  $L_{\text{пм.р}}$  и  $L_{\text{пм.з}}$  выбираются исходя из следующих соображений: потери в тракте ретранслятора составляют около 0,5 дБ при отдельных трактах передачи и приема и 1...1,5 дБ при их совмещении. Потери в приемном тракте ЗС при размещении входных каскадов приемника в кабине, вращающейся вместе с антенной, не превышают 0,3 дБ. Ослабление сигнала в тракте передачи ЗС связано с размерами и конструкцией антенны и ее опорно-поворотного устройства и составляет 1...3 дБ. Множитель ослабления поля свободного пространства на спутниковой линии связи

$$V_{\text{з.с}} = V_a V_{\text{ос}} V_{\text{обт}} V_n V_{\text{пол}}, \quad (13)$$

где  $V_a$  и  $V_{\text{ос}}$  – ослабление радиоволн атмосферой и осадками;  $V_{\text{обт}}$  – потери в слое воды на поверхности обтекателя;  $V_n$  и  $V_{\text{пол}}$  – потери из-за неточности наведения и несовпадения поляризаций антенн [11].

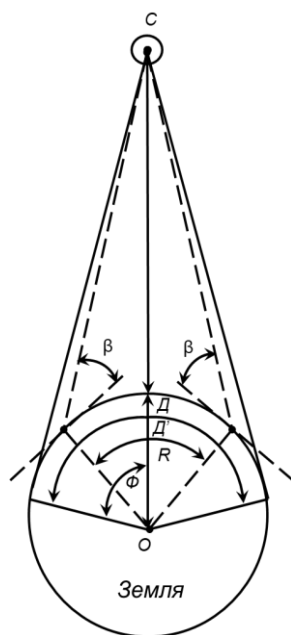


Рисунок 1 – Зависимость зоны радиовидимости спутника от высоты орбиты

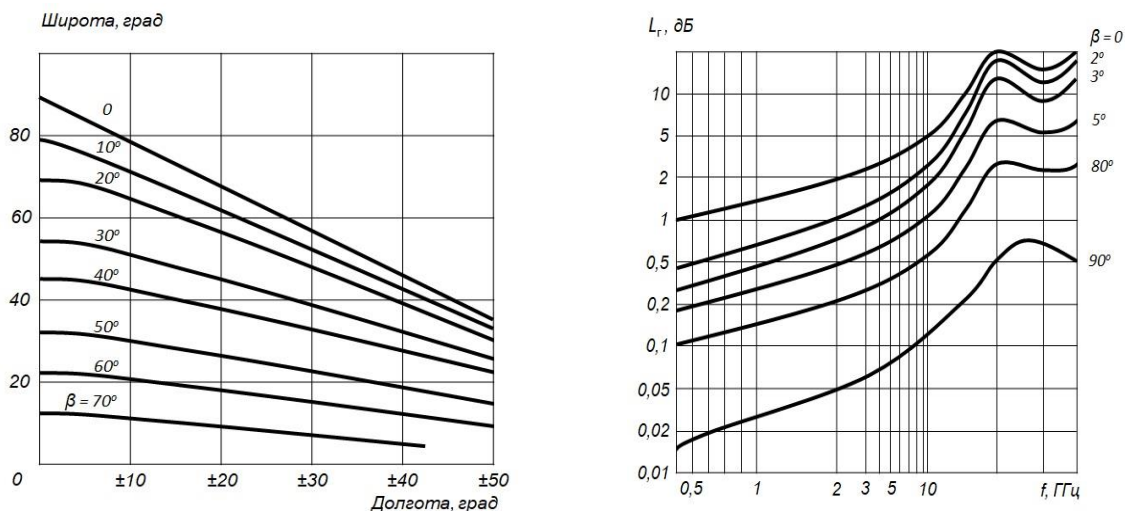


Рисунок 2 – Зависимость широты места и долготы относительно подспутниковой точки

Рисунок 3 – Зависимость потерь  $L_r$  в газах тропосферы от частоты для различных углов места

Ослабление, вызываемое осадками, зависит от их интенсивности и угла возвышения антенны ЗС. На основной территории России наибольшая среднемесячная интенсивность дождя с вероятностью 99,9% не превышает 3 мм/ч, что при  $\beta \geq 5^\circ$  дает на частотах 4...6 ГГц потери из-за осадков около 0,5 дБ, и ими можно пренебречь [12]. Более существенно влияет дождь на частотах выше 110 ГГц. Для примера в

таблице 1 даны суммарные коэффициенты затухания в атмосфере и осадках в зависимости от угла  $\theta$ , не превышаемые в течение 99 и 99,9% времени наихудшего месяца на частоте 11,5 ГГц.

Суммарные коэффициенты затухания в атмосфере и осадках

Таблица 1

| $\theta^\circ$ |              | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  |
|----------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $V_a V_{oc}$   | $T = 99\%$   | 6,1 | 4,2 | 2,9 | 2,2 | 1,9 | 1,6 | 1,5 | 1,4 |
| дБ             | $T = 99,9\%$ | 13  | 8,7 | 6,6 | 5,7 | 5,1 | 4,8 | 4,5 | 4,4 |

Потери из-за неточности наведения антенны на спутник  $V_n$  составляют около 0,1 дБ, а ослабление сигнала при несогласованности поляризационных характеристик  $V_{пол}$  обычно не превышает 0,25 дБ. Наличие обтекателя антенны может дать заметное ослабление сигнала. Так, при толщине пленки воды на его поверхности около 2 мм на частоте 3,65 ГГц вносимое затухание  $V_{обт}$  достигает 2 дБ, а на частоте 9,3 ГГц – около 6 дБ [13].

Выбрав параметры приемной антенны ЗС и определив по (12)  $T_{эз}$ , по (10) находим добротность приемной системы  $D$ . Энергетический расчет ССП сводится к определению ЭИИМ земной станции  $\mathcal{E}_з$  и ретранслятора  $\mathcal{E}_с$  и выбору по ним мощностей передатчиков и коэффициентов усиления антенн согласно (8).

Выбор энергетических параметров участка вниз, а именно  $P_{пл\cdot p}$  и  $G_{пр\cdot э}$ , является первоочередной и важнейшей задачей экономической оптимизации параметров любой ССП. Стоимость ЗС в значительной степени определяется стоимостью антенны. В первом приближении мощность растет пропорционально квадрату диаметра антенны. Увеличение размеров земной антенны позволяет уменьшить мощность передатчика ретранслятора. С другой стороны, уменьшая суммарную шумовую температуру на входе приемника ЗС, можно добиться заданных показателей качества ССП при меньших диаметрах антенных ЗС и мощностях передатчиков ретранслятора [14,15].

При проектировании приходится считаться с различными технологическими ограничениями (масса ИСЗ, мощность выходных каскадов ретранслятора, емкость солнечных батарей и т.п.).

Поскольку ЭИИМ ретранслятора зависит от коэффициента усиления установленной на ИСЗ антенны, то с уменьшением зоны обслуживания можно увеличить  $G_{пл\cdot p}$  и за счет этого уменьшить  $P_{пл\cdot p}$ . И хотя увеличение размеров антенны и точность ее наведения повышают стоимость ИСЗ, тем не менее ради уменьшения  $P_{пл\cdot p}$  и по ряду других причин можно полагать целесообразным во всех случаях стремиться к максимально возможному  $G_{пл\cdot p}$ , вплоть до разбиения всей зоны обслуживания на ряд отдельных зон, для каждой из которых формируется самостоятельный луч диаграммной направленности.

Таким образом, в статье рассмотрены особенности расчета и проектирования спутниковой линии связи. Сакцентировано внимание при расчете на том, что орбита, способ многостанционного доступа и назначение каналов, а также диапазон рабочих частот были заранее заданы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Ломакин А.А. Методический подход к радиоконтролю сигналов спутниковой связи с оценкой требуемых энергетических характеристик приемных станций // Известия вузов. Электроника. 2022. №3. С. 382-406.
2. Ляхов А.В. Повышение энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи при трансионосферном распространении радиоволн через неоднородную ионосферу за счет понижения несущих частот и пространственно-разнесенного приема. Часть 1. Постановка задачи повышения энергетической скрытности и ее решение // Системы управления, связи и безопасности. 2022. №4. С. 256-312.
3. Ляхов А.В. Повышение энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи при трансионосферном распространении радиоволн через неоднородную ионосферу за счет понижения несущих частот и пространственно-разнесенного приема. Часть 2. Вычислительный эксперимент по оценке границ повышения энергетической скрытности и анализ его результатов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. №4. С. 313-367.
4. Федоров А.А., Сошилов И.В., Логинов В.Н. Эвристические алгоритмы поиска маршрутов передачи данных в спутниковых системах и их валидация // Труды МФТИ. 2020. №3 (47). С. 66-74.
5. Радиорелейные и спутниковые системы передачи: учебник для вузов / А.С. Немировский, О.С. Данилович, Ю.И. Маримонт и [др.]. – М.: Радио и связь, 1986. 392 с.
6. Карпенко Е.А., Кравчин М.В., Сергиенко А.В., Андрашитов Д.С. Проблемы реализации облачных технологий в низкоорбитальных космических системах персональной спутниковой связи и передачи данных и телеуправление // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2023. №1. С. 4-9.
7. Акмолов А.Ф., Ковальский А.А., Ефимов С.Н. Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разнорысотной орбитальной группировки // Труды учебных заведений связи. 2020. №1. С. 22-31.
8. Алешин В.С., Догаев С.Г. Задержки распространения сигналов в сетях спутниковой связи // Т-Comm. 2019. №5. С. 4-11.
9. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Ломакин А.А. Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования земли и космических ретрансляторов // Известия вузов. Электроника. 2022. №1. С. 120-149.
10. Калинин В.С., Велов С.П. Обзор источников помех в спутниковых системах связи // Научный результат. Информационные технологии. 2022. №3. С. 3-13.
11. Пичугин С.В. Модели массового обслуживания с простейшими потоками для низкоорбитальной спутниковой системы // Известия вузов. Машиностроение. 2022. №1 (742). С. 61-70.



12. Карсаев О. В. Концептуальная модель маршрутизации данных в многоспутниковой низкоорбитальной системе связи // Приборостроение. 2021. №10. С. 852-858.
13. Седунов Д.П., Жунусова А.С. Разработка алгоритма приема и декодирования входного сигнала с применением МПД декодера для абонентских терминалов, работающих с низкоорбитальными космическими аппаратами // ОНВ. 2021. №1 (175). С. 59-63.
14. Радиорелейные и спутниковые системы передачи: учебник для вузов / Под ред. А.С. Немировского. – М.: Радио и связь, 1986. – 392 с.
15. Алтухов А.А., Зеленовский Ю.В., Филатов В.И. Имитационное моделирование спутниковой системы связи с изменяемой орбитальной структурой // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. №1. С. 21-27.

УДК 621.382

**Казанков<sup>1</sup> А.А., Сергеев<sup>2</sup> В.А., Фролов<sup>3</sup> И.В., Радаев<sup>4</sup> О.А., Кузьмин<sup>5</sup> Н.П.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А.Котельникова Российской академии наук, Ульяновск, Россия

<sup>1,5</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

<sup>1,2,3,4,5</sup> kazanaa1992@mail.ru

## **ЦИФРОВЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ С ОПТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

**Аннотация.** Представлен краткий обзор вариантов применения встроенных датчиков температуры для контроля тепловых режимов работы электронных устройств, в частности электронных модулей (ЭМ) и микросборок (МС). Описаны варианты цифровых датчиков температуры на основе микросхемы триггера Шмитта и микросхемы NST 1001 с оптическим каналом передачи информации с использованием светодиода. Приведены результаты измерения функций преобразования датчиков и расчета их чувствительности в диапазоне температур от 15 до 110 °С. Показана возможность контроля температуры ЭМ и МС в месте расположения датчика с погрешностью, не превышающей 1 °С, и временем отсчета порядка 50 мс.

**Ключевые слова:** электронное устройство, температурное поле, цифровой датчик температуры, оптический канал передачи информации

**Kazankov<sup>1</sup> A.A., Sergeev<sup>2</sup> V.A., Frolov<sup>3</sup> I.V., Radaev<sup>4</sup> O.A., Kuzmin<sup>5</sup> N.P.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia

<sup>1,5</sup> Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

<sup>1,2,3,4,5</sup> kazanaa1992@mail.ru

## **DIGITAL TEMPERATURE SENSORS WITH AN OPTICAL INFORMATION TRANSMISSION CHANNEL FOR TEMPERATURE MONITORING OF ELECTRONIC DEVICES**

**Abstract.** This article provides a brief overview of the applications of embedded temperature sensors for monitoring the thermal conditions of electronic devices, particularly electronic modules (EM) and microassemblies (MA). It describes the use of digital temperature sensors based on the Schmitt trigger chip and the NST 1001 chip with an optical communication channel using an LED. The article presents the results of measuring the sensor conversion functions and calculating their sensitivity in the temperature range from 15 to 110 °C. The possibility of monitoring the EM and MS temperature at the sensor location with an error of no more than 1 °C and a sampling time of about 50 ms is shown.

**Keywords:** electronic device, temperature field, digital temperature sensor, optical information transmission channel

### **Введение**

Известно, что функциональная и физическая надежность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при испытаниях и эксплуатации во многом определяется температурой электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и элементов конструкции РЭА [1, 2]. Наряду с конструктивными решениями по снижению перегрева элементов РЭА активно разрабатываются методы и средства теплового контроля и мониторинга температуры РЭА в процессе испытаний и эксплуатации. Хорошо разработанные и широко применяемые в различных областях техники методы и средства ИК-термометрии [3, 4] имеют низкое быстродействие, малое пространственное разрешение и не пригодны для полностью готовых изделий микроэлектроники.

Встроенные в электронное устройство датчики температуры с передачей измерительной информации по проводной (гальванической) связи, несмотря на ряд существенных недостатков, находят широкое применение на практике и продолжают совершенствоваться. Для измерения температуры элементов силовых электронных модулей и микросборок (ЭМ и МС) и их защиты от перегрева на практике применяют различные виды встроенных электрических датчиков температуры, наиболее распространенными из которых являются терморезисторы с отрицательным (Negative Thermal Coefficient NTC) или положительным (Positive Thermal Coefficient PTC) температурным коэффициентом [5–10]. Одна из серьезных проблем применения терморезисторов для определения температуры активных элементов ЭМ и МС состоит в невозможности контроля мгновенного значения температуры кристалла активного элемента, поскольку система «чип-сенсор» имеет большую тепловую инерцию. В качестве встроенных датчиков температуры используются также кремниевые PTC-резисторы с жестким контролем тока или резисторы на основе платины (Pt) или никеля (Ni) с умеренно низкими значениями сопротивления и более линейными характеристиками.

Общим недостатком встроенных датчиков температуры элементов РЭА с передачей информации через гальванические контакты и проводники, наряду с инерционностью контактных тепловых систем, является передача слабых сигналов датчика по проводникам и значительная погрешность измерения, обусловленная наводками на этих токоведущих проводниках, сравнимыми по уровню с уровнем полезного сигнала.

Беспроводные дистанционные способы измерения температуры электронных компонентов РЭА в процессе испытаний или эксплуатации заключаются в размещении

непосредственно на контролируемом компоненте или вблизи него оптического датчика температуры (пленки термохромного материала волоконно-оптические датчики (ВОД) с температурочувствительными оптическими элементами и в измерении оптического температурочувствительного параметра этого датчика с помощью цветочувствительных или спектрочувствительных оптических приборов [11–13]. Эти методы требуют применения сложной аппаратуры, трудоемки при реализации и имеют низкое быстродействие и не позволяют, в частности измерять ПТХ контролируемых элементов.

Наиболее перспективными на наш взгляд дистанционными методами измерения температуры элементов РЭА в процессе испытаний или эксплуатации являются методы с использованием активных датчиков температуры – полупроводниковых или органических светоизлучающих приборов, параметры излучения которых зависят от температуры. Такие методы активно разрабатываются в последнее десятилетие в связи с прогрессом в разработке микроминиатюрных светоизлучающих приборов, так и быстродействующих фотоприемников [14, 15]. В ряде работ в качестве датчика температуры предлагается использовать рекомбинационное излучение встроенных в мощные полупроводниковые приборы защитных диодов [16, 17]. Известные способы активной оптической термометрии также требуют сложной юстировки и калибровки. Эти способы еще не отработаны и не нашли применения на практике.

Многообещающими на наш взгляд для бесконтактного дистанционного контроля температуры активных элементов и элементов конструкции электронных устройств представляются микросистемные датчики температуры с цифровым выходом и оптическим каналом передачи измерительной информации. Теплоёмкость интегрального датчика должна быть существенно меньше теплоёмкости контролируемого элемента, что в большинстве практических случаев выполняется без затруднений и обеспечивает минимальное влияние датчика на тепловой режим объекта измерения. В данной статье представлены результаты разработки и исследования характеристик двух таких датчиков.

#### 1 Датчик температуры на триггере Шмитта

Датчик температуры с импульсным выходом и оптическим каналом передачи оптической информации был собран по схеме мультивибратора на триггере Шмитта SN74LVC1G14DBVR (рисунок 1).

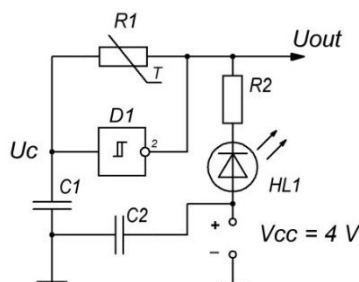


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная датчика температуры

Термочувствительным элементом является терморезистор R1 с номинальным сопротивлением 10 кОм при температуре 25 °С. Светодиод VD1 типа SIR0805CS с длиной волны в максимуме спектра излучения 940 нм используется для преобразования электрических колебаний на выходе датчика, в импульсное оптическое излучение. Принцип работы датчика поясняется временными диаграммами, представленными на рисунке 2.

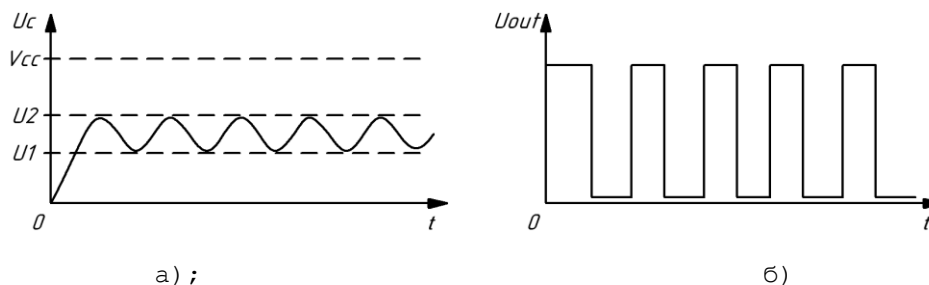


Рисунок 2 – Временная диаграмма напряжения на конденсаторе C1 (а) и выходного напряжения (б) датчика температуры на триггере Шмитта

В начальный момент времени конденсатор C1 номиналом 470 нФ не заряжен и на входе триггера Шмитта – уровень логического нуля, соответственно на выходе триггера – логическая единица, светодиод HL1 выключен. Через терморезистор R1 начинает протекать ток, под действием которого конденсатор C1 заряжается. При достижении напряжения на конденсаторе C1 уровня верхнего порога переключения

триггера (U2) выходное напряжение триггера переходит в состояние логического нуля, светодиод включается. Ток светодиода ограничивается резистором R2 с сопротивлением 1 кОм и составляет 2 мА. Далее начинается разряд конденсатора C1 через терморезистор R1. При достижении напряжения на конденсаторе уровня нижнего порога переключения триггера (U1) триггер переключается в состояние логической единицы, светодиод выключается. Снова начинается заряд конденсатора до уровня U2. Далее процесс повторяется периодически. Таким образом, оптический сигнал светодиода представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с частотой, определяемой параметрами частото задающих элементов схемы:

$$f = \frac{1}{0.5R_1C_1} \quad (1)$$

При температуре 25 °С и частота импульсов составляет 600 Гц.

Поскольку сопротивление терморезистора уменьшается при увеличении температуры, частота колебаний автогенератора увеличивается. Зависимость частоты колебаний автогенератора от температуры, измеренная в диапазоне от 25 °С до 100 °С при размещении датчика в термостате CH3-150 Combitherm, приведена на рисунке 3.

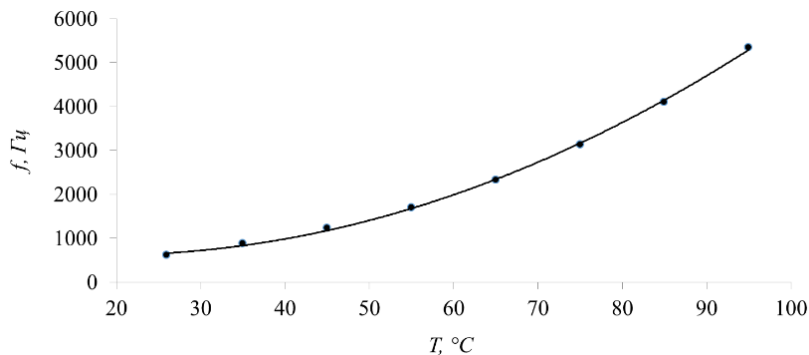


Рисунок 3 – Функция преобразования температуры в частоту колебаний мультивибратора на триггере Шмитта

Видно, что зависимость  $f(T)$  нелинейная и удовлетворительно описывается полиномом второй степени:

$$f_{Hz}(T_{°C}) = 0.801T^2 - 29.789T + 894.98 \quad (2)$$

Калибровочная характеристика датчика на триггере Шмитта, представляющая собой зависимость  $T(f)$ , аппроксимируется полиномом четвертой степени:

$$T_{°C}(f_{Hz}) = -2 \times 10^{-13}f^4 + 3 \times 10^{-9}f^3 - 2 \times 10^{-5}f^2 + 0.0544 f - 1.473 \quad (3)$$

Экспериментальные результаты, обозначенные точками, и график аппроксимирующей функции (3) приведены на рисунке 4.

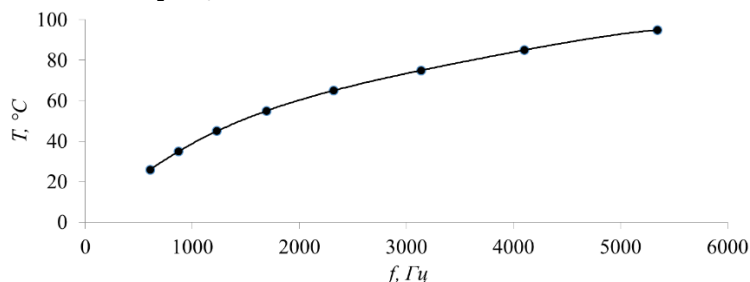


Рисунок 4 – Калибровочная характеристика датчика температуры на триггере Шмитта

Чувствительность датчика, рассчитанная как производная функции (2):

$$S = \frac{df_{Hz}(T_{°C})}{dT_{°C}}, \quad (4)$$

Чувствительность датчика линейно возрастает при увеличении температуры (рисунок 5).

При наименьшей чувствительности, равной порядка 10 Гц/°С, время измерения частоты для определения температуры с погрешностью 1 °С составляет порядка 100 мс.

## 2 Датчик температуры на микросхеме NST1001

В качестве чувствительного элемента датчика температуры с импульсным выходом может быть использована микросхема NST1001-QDNR серии D-NTC® компании NOVOSENSE Microelectronics [18] с габаритными размерами 0,8×1,6 мм. Микросхема имеет высокую точность и разрешающую способность в диапазоне температур от -50 до 150 °С и пригодна для измерения температуры изделий микроэлектроники.

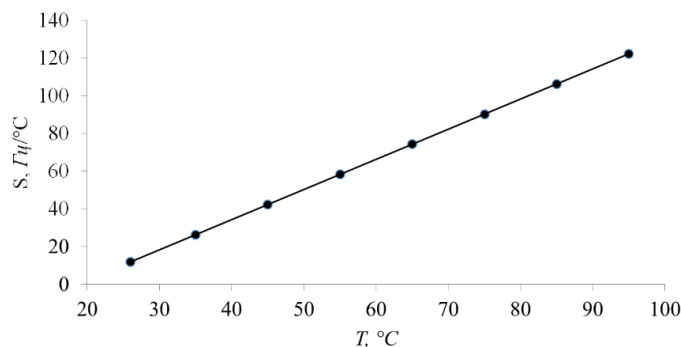


Рисунок 5 – Чувствительность датчика температуры на триггере Шмитта

Микросхема NST1001 имеет встроенный фильтр электромагнитных помех, что позволяет использовать его в устройствах с высоким уровнем помех и в беспроводных узлах датчиков IoT с особенно строгими требованиями к питанию. Из-за очень низкого рабочего тока подключение датчика возможно как напрямую к выводам GPIO микроконтроллера (рисунок 6, а), так и к светоизлучающим диодам при реализации оптического канала передачи информации (рисунок 6, б). В схеме, представленной на рисунке 6б, резистор R1 выполняет функцию ограничения тока через светоизлучающий диод при передаче измерительной информации, а резистор R2 обеспечивает питание микросхемы NST1001-QDNR в процессе проведения измерений. Выходной сигнал датчика, снимаемый с вывода питания DQ, имеет импульсный характер и представляет собой последовательность электрических импульсов, количество которых  $N$  за заданный интервал времени пропорционально значению измеряемой температуры.

Основные технические характеристики микросхемы NST1001-QDNR:

- среднее время одного измерения с передачей данных 50 мс;
- погрешность измерения значений температуры в диапазонах
- $20^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C} : \pm 0,5^\circ\text{C}$  (макс.),
- $50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C} : \pm 0,75^\circ\text{C}$  (макс.);
- разрешающая способность  $0,0625^\circ\text{C}$ ;
- напряжение питания 1,65 – 5,5 В.

Температура определяется по калибровочной зависимости:

$$T = 0,0625 \cdot N - 50,0625 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

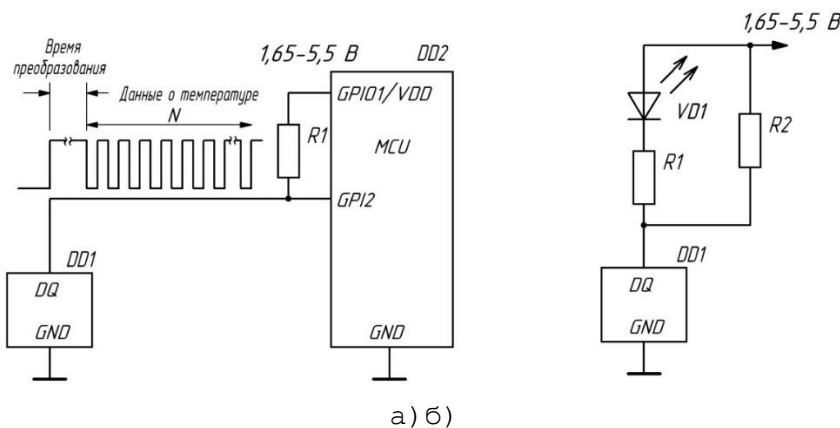


Рисунок 6 – Схема включения датчика NST1001-QDNR: с питанием от микроконтроллера (а) [20], с оптическим каналом передачи измерительной информации (б)

Статические характеристики датчика NST1001 (рисунок 7) определялись экспериментально путём его нагрева в камере термостата CH3-150 Combitherm.

С целью автоматизации процесса измерения температурных характеристик была разработана и реализована измерительная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 8. В составе установки для приёма информации о значении температуры используется специально разработанное фотоприёмное устройство, осуществляющее преобразование оптического сигнала, формируемого датчиком температуры, в электрический сигнал, пригодный для последующей цифровой обработки.

Обработка выходного сигнала фотоприёмного устройства осуществляется микроконтроллером Arduino Nano по методике, описанной в [19]. Микроконтроллер подсчитывает число импульсов  $N$ , поступающих с выхода фотоприёмника за заданный интервал времени, что позволяет реализовать устойчивое к помехам измерение температуры за счёт преобразования измеряемой величины в частотный (импульсный) сигнал.

Температура контролируется с помощью измерительного прибора Актаком АТТ-2002 с термопарой типа К, установленной непосредственно на корпусе датчика NST1001-QDNR. Передача данных о температуре с прибора АТТ-2002 реализуется по интерфейсу RS-232 с последующей их регистрацией контроллером, что обеспечивает синхронное получение эталонных температурных значений.

Сбор, обработка и визуализация экспериментальных данных, поступающих с контроллера, осуществляются на персональной ЭВМ с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

На рисунке 9 представлена экспериментально полученная градуировочная зависимость температуры корпуса датчика от количества формируемых им импульсов  $N$ , а также её аппроксимирующая функция. Полученная зависимость используется для последующего пересчёта измеряемого импульсного сигнала в значение температуры при проведении динамических измерений.



Рисунок 8 – Структурная схема установки для исследования датчика на основе микросхемы NST1001 с оптическим способом передачи информации

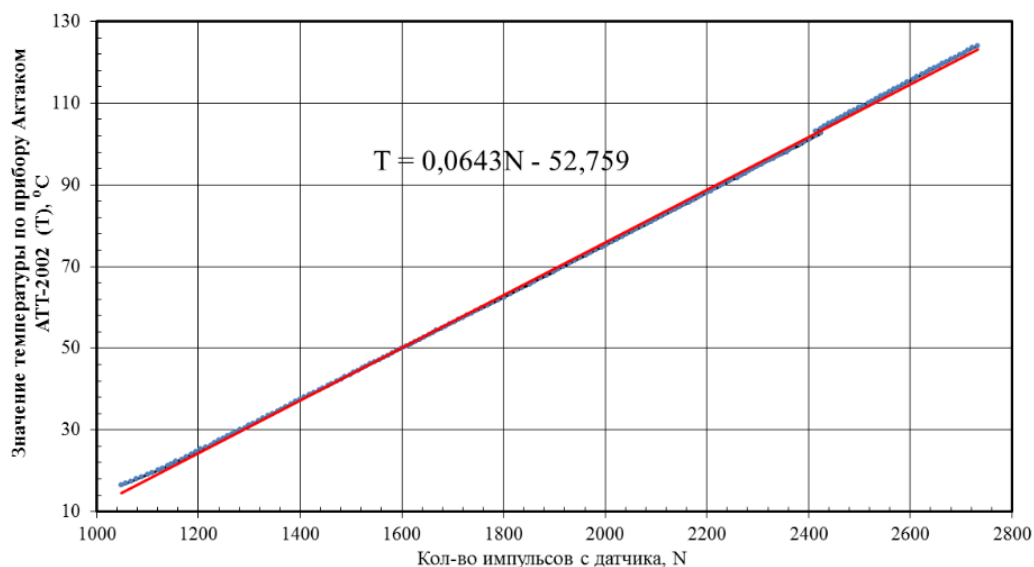


Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость числа импульсов с датчика с оптическим способом передачи информации NST1001-QDNR от температуры

Динамические характеристики NST1001-QDNR оценивались экспериментально путём ее установки на корпус мощного полевого транзистора IRF4905 методом пайки, обеспечивающим надёжный тепловой контакт и минимальное тепловое сопротивление в зоне измерения. В ходе эксперимента транзистор переводился в активный режим работы с заданной мощностью рассеяния, что приводило к его нагреву. Температура корпуса транзистора дополнительно контролировалась с помощью термопары типа К, обеспечивающей независимую регистрацию температурных изменений и позволяющей оценить точность и динамические свойства исследуемого датчика. Измерения проводились с временным шагом 100 мс, после чего выполнялся пересчёт количества импульсов  $N$  в значения температуры с использованием ранее полученной аппроксимирующей зависимости.

На рисунке 10 представлены динамические характеристики датчика NST1001 для двух значений мощностей рассеяния на греющем транзисторе.  $P_{\text{рас1}} = 12,6$  Вт и  $P_{\text{рас2}} = 22,6$  Вт. С целью предотвращения выхода из строя и деградации полевого

транзистора IRF4905 измерения проводились до достижения критического значения температуры 110 °С.

Полученные результаты демонстрируют адекватное воспроизведение температурных переходных процессов и подтверждают возможность использования датчика для мониторинга быстроизменяющихся температурных режимов элементов РЭА.

**Заключение.** Рассмотрены варианты бесконтактного измерения температуры в нескольких точках конструкции ЭУ температурными датчиками с передачей измерительной информации по оптическим каналам, разделенным по длине волны излучения, и с использованием в качестве чувствительных элементов датчика интегральных схем с импульсным выходом.

Рассмотрены варианты реализации таких датчиков на основе современных интегральных схем, в том числе на микросхеме триггера Шмитта SN74LVC1G14DBVR и микросхеме NST1001-QDNR. Определены функции преобразования и зависимости чувствительности датчиков от температуры. Результаты экспериментальной апробации датчика на микросхеме NST1001-QDNR при измерении температуры корпуса мощного транзистора IRF4905 подтвердили работоспособность предложенного подхода и пригодность датчика для регистрации как статических, так и динамических температурных характеристик изделий микроэлектроники.

Показано, что использование оптических каналов передачи информации позволяет существенно снизить влияние электромагнитных помех и исключить гальваническую связь между датчиком и системой обработки, что особенно важно при контроле температуры элементов, находящихся под электрическим потенциалом.

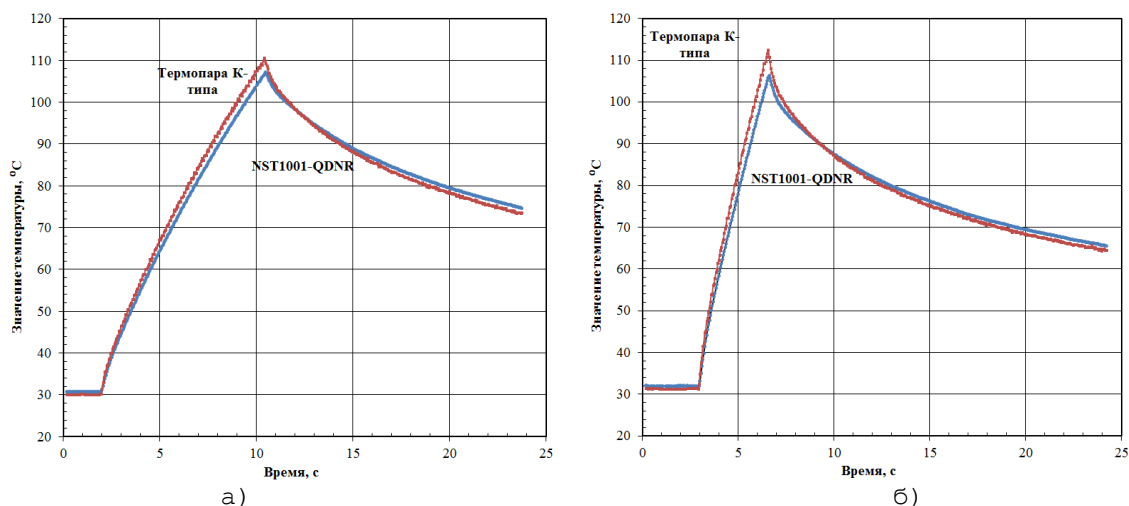


Рисунок 10 – Динамические характеристики датчика NST1001 с оптическим способом передачи информации при мощности рассеяния транзистора  $P_{рас1} = 12,6$  Вт (а) и  $P_{рас2} = 22,6$  Вт (б)

Предложенные датчики могут быть использованы для оперативного мониторинга температуры элементов конструкции элементов РЭА с погрешностью не более 1°С.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-91-06504.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев В.А. Оптоэлектронные методы дистанционного контроля температуры активных элементов электронных модулей / В.А. Сергеев, Р.Г. Тарасов, И.С. Козликова // Надежность и качество - 2021: труды международного симпозиума. Т. 2. / Под ред. Н.К. Юркова - Пенза : Изд-во ПГУ, 2013 - С. 92-95.
2. Антти Э. Причины температурного перегрева электронных компонентов и пути инженерных решений / Э. Антти // Силовая электроника. 2023. № 2. С. 54-59.
3. Исаев С.С. Методика тепловизионного контроля неисправностей печатных узлов РЭА на этапе производства / С.С. Исаев, Н.К. Юрков // Надежность и качество-2013: труды международного симпозиума. Т. 2. / Под ред. Н.К. Юркова - Пенза : Изд-во ПГУ, 2013 - С. 92-95.
4. Dupont L., Avenas Y., Jeannin P.-O. Comparison of Junction Temperature Evaluations in a Power IGBT Module Using an IR Camera and Three Thermosensitive Electrical Parameters // IEEE Transaction on Industrial Applications. - 2013. - Vol. 49, № 4. - 1599-1608.
5. Колпаков А., Карташев Е. Контроль тепловых режимов силовых модулей // Компоненты и технологии. 2010. №4. С. 83-86.
6. Вербенец А. Использование встроенного NTC-резистора для измерения температуры IGBT-модулей // Силовая электроника 2010, № 2 С. 28-30.
7. Дрекседж П, Винтрич А. Встроенный термодатчик и «виртуальная» температура кристалла: как использовать сенсор для анализа тепловых режимов силового модуля // Силовая элементная база 2020, №4 С. 34-41.
8. Stas A., Bruno B.-V. NTC Temperature Control for IGBT and Power MOSFET Modules //
9. Vishay NLR Product Marketing Date 03/01/2021
10. Schulz M. Ma X. Correlating NTC-Reading and Chip-Temperature in Power Electronic Modules // May 2015 Conference: PCIM 2015.

11. Zhou Y. *et al.* Dynamic junction temperature estimation via built-in negative thermal coefficient (NTC) thermistor in high power IGBT modules // *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, FL, USA, 2017, pp. 772-775, doi: 10.1109/APEC.2017.7930782.
12. Абрамович Б. Г. Цветовые индикаторы температуры / Б.Г. Абрамович, В.Ф. Картавцев. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
13. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников; под. Ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
14. Карицкая С. Г. Диагностика полей температур и скоростей люминесцентными методами. Дисс. на соискание ученой степени к. ф.-м. н., 1997 год.
15. Патент 2589525 РФ. Способ дистанционного измерения температуры // А.Б. Власов, М.М. Кореннов. – Оpubл. 10.07.2016 Бюл. № 19.
16. Патент 2534452 РФ. Способ дистанционного измерения температуры среды // А.Б. Власов, П.Г. Деревянкин. – Опубликовано: 27.11.2014 Бюл. № 33.
17. Li C, Lu Z., Wu H., Li W., He X., Li S. Junction Temperature Measurement Based on Electroluminescence Effect in Body Diode of SiC Power MOSFET, 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, 2019, pp. 338-343, doi: 10.1109/APEC.2019.8722249.
18. Susinni G., Rizzo S.A., Iannuzzo F., Raciti A. A non-invasive SiC MOSFET Junction temperature estimation method based on the transient light Emission from the intrinsic body diode, *Microelectronics Reliability*, 2020, 113845.
19. High-Accuracy 2-pins Digital Output Temperature Sensor with Pulse Count [Электронный ресурс]. – URL: <https://data.electronshik.ru/z/Datasheet/N/NST1001-QTZB.pdf> (дата обращения: 15.04.2026).
20. Казанков, А. А. Применение платформы Arduino для автоматизации измерений / А. А. Казанков, Ю. П. Лавренова // *Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. Выпуск 14.* – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2022. – С. 117-121.



УДК 618.1

**Мамонтов<sup>1</sup> В.С., Дарьин<sup>2</sup> В.Д., Мишин<sup>3</sup> А.В., Юдин<sup>4</sup> И.Д., Гордон<sup>5</sup> А.А.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4,5</sup> kipra@pnzgu.ru

### ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Аннотация.** В эпоху стремительного технологического прогресса и повсеместного внедрения интеллектуальных систем акселерометры занимают центральное место в ряде инноваций, предлагая уникальные возможности для измерения и анализа движений. Эти малые, но высокоточные устройства преобразуют динамические свойства физических систем в цифровые сигналы, позволяя отслеживать изменения ускорения, ориентации и колебаний с большой точностью. Необходимость в таких устройствах продолжает расти, отражая интерес к развитию технологий управления и мониторинга, что делает акселерометры ключевыми элементами в системах безопасности, навигации и оценки физической активности. Современные исследования и разработки в области акселерометрических технологий открывают новые горизонты их применения, обеспечивая высокую чувствительность, компактность и интеграцию с другими сенсорными системами.

**Ключевые слова:** датчики, акселерометры, тонкопленочная технология

**Mamontov<sup>1</sup> V.S., Daryin<sup>2</sup> V.D., Mishin<sup>3</sup> A.V., Yudin<sup>4</sup> I.D., Gordon<sup>5</sup> A.A.**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4,5</sup> kipra@pnzgu.ru

### TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF SENSOR APPARATUS BASED ON THIN-FILM TECHNOLOGIES

**Abstract.** In an era of rapid technological advancements and the widespread adoption of intelligent systems, accelerometers have become central to a range of innovations, offering unique capabilities for measuring and analyzing motion. These small yet highly precise devices convert the dynamic properties of physical systems into digital signals, allowing for the precise tracking of changes in acceleration, orientation, and vibrations. The demand for such devices continues to grow, reflecting the growing interest in developing control and monitoring technologies, making accelerometers key components in security systems, navigation, and physical activity assessment. Modern research and development in the field of accelerometer technologies opens up new horizons for their application, providing high sensitivity, compactness, and integration with other sensor systems.

**Keywords:** sensors, accelerometers, thin-film technology

#### Введение

Акселерометр – это устройство, предназначенное для измерения ускорения или изменения скорости объекта в пространстве. Основная функция акселерометра заключается в определении силы, действующей на него, что позволяет вычислять ускорение в одном или нескольких направлениях.

#### Основная часть

Существует несколько основных видов акселерометров которые используются в разных отраслях промышленности, такие как пьезоэлектрические акселерометры, MEMS-акселерометры (микроэлектромеханические системы), тонкопленочные акселерометры на основе термопар, пьезорезистивные акселерометры. Каждый из этих типов тонкопленочных акселерометров имеет свои преимущества и недостатки, что делает их подходящими для разных приложений в зависимости от требований к точности, размеру и стоимости.



Рисунок 1 – пьезоэлектрический акселерометр

Пьезоэлектрические акселерометры представляют собой устройства, использующие пьезоэлектрический эффект для измерения ускорения (Рис.1). Этот эффект проявляется в способности определённых материалов, таких как кварц, генерировать электрический заряд в ответ на механическое напряжение. При приложении силы к пьезоэлектрическому материалу осуществляется его деформация, что приводит к возникновению электрического сигнала, пропорционального приложенному ускорению.

Пьезоэлектрические акселерометры имеют как плюсы, так и минусы, для начала рассмотрим положительные качества. Во-первых, одним из самых значительных преимуществ пьезоэлектрических акселерометров является их высокая чувствительность. Эти устройства способны обнаруживать незначительные изменения в ускорении, что делает их идеальными для применения в задачах, требующих высокой точности. Во-вторых, пьезоэлектрические акселерометры имеют широкий диапазон частот. Они могут эффективно функционировать на высоких частотах, что позволяет использовать их для анализа вибраций и колебаний в структурной динамике. Следующим преимуществом является их компактные размеры, из-за этого их можно использовать в малогабаритном оборудовании. И последним значимым качеством является быстрый отклик датчика ускорения. Эти устройства обеспечивают мгновенный ответ на изменения ускорения.

Тем не менее, у пьезоэлектрических акселерометров есть и свои ограничения. Первое значимое ограничение заключается в том, что они не могут измерять постоянное ускорение. Это связано с особенностями их работы: пьезоэлектрические сенсоры фиксируют только изменения, а не статические значения. Также стоит отметить температурную чувствительность пьезоэлектрических материалов. Их характеристики могут изменяться в зависимости от температуры, что потенциально может повлиять на точность измерений. В таких случаях часто требуется установка дополнительных систем компенсации, что усложняет конструкцию и может увеличить стоимость. Ограниченные возможности в низкочастотном диапазоне также могут быть существенным недостатком. Хотя пьезоэлектрические акселерометры отлично работают на высоких частотах, их эффективность может снижаться при низких частотах.

Пьезоэлектрические акселерометры находят широкое применение в различных сферах: в авиации и космонавтике они используются для мониторинга вибраций и динамических нагрузок на летательных аппаратах, в строительстве – для измерений в сейсмологии и геотехнической инженерии, в промышленности – для контроля состояния машин и процессов, а также в медицинских устройствах, где их применяют в биомеханических исследованиях и диагностике.

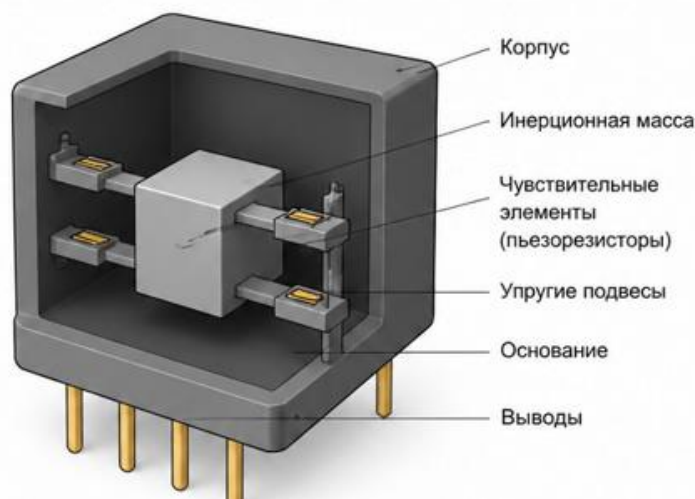


Рисунок 2 – пьезорезистивный акселерометр

Пьезорезистивные акселерометры представляют собой устройства, использующие пьезорезистивный эффект для измерения ускорения (Рис.2). Пьезорезистивный эффект заключается в том, что электросопротивление материала изменяется при воздействии на него механического напряжения. Работа пьезорезистивных акселерометров основана на изменении сопротивления пьезорезистивных материалов (например, кремния или различных металлов) под действием механического напряжения, возникающего в результате ускорения. Когда устройство подвергается ускорению, возникает механическое напряжение, которое изменяет геометрию и, как следствие, электрическое сопротивление материала.

Пьезорезистивные акселерометры, в отличие от пьезоэлектрических, характеризуются широким диапазоном частот. Они способны эффективно измерять как низкие, так и высокие частоты. Компактные размеры и легкий вес также являются ощутимыми

преимуществами пьезорезистивных акселерометров. Кроме того, эти акселерометры обладают высокой надежностью. Они менее подвержены механическим повреждениям и имеют длительный срок службы благодаря отсутствию подвижных частей. Это свойство делает их более устойчивыми к внешним воздействиям и потенциальным повреждениям.

Несмотря на преимущества, пьезорезистивные акселерометры также имеют и ряд недостатков. Схожесть используемых в конструкции, как пьезорезистивных, так и пьезоэлектрических датчиков материалов, определяет и аналогичный набор недостатков данной технологии. Точно так же, как в предыдущем разделе, существенными факторами являются низкая стабильность смещения и плохая термостабильность, чувствительность к влажности, отсутствие возможности статических измерений и реализации самотестирования. Дополнительно ухудшает ситуацию с эксплуатацией пьезорезистивных датчиков крайне плохая нелинейность, что вновь ведет к необходимости использования полиномов высоких порядков для компенсации внешних условий, и низкий коэффициент усиления, определяющий разрешающую способность датчика.

Резюмируя, следует отметить, что при всех своих недостатках пьезорезистивные акселерометры могут с успехом использоваться для измерений усилий, перемещений и давления, особенно в условиях задач, требующих работы при высоких температурах, больших ускорениях и потенциальной возможности ударных воздействий. В том числе, этот тип датчиков может быть использован и при решении промышленных задач.

#### Заключение

Рассмотрев некоторые виды акселерометров можно сравнить и выбрать тот датчик ускорения, который подойдет для конкретной задачи и габаритных характеристик. Если критичны высокая чувствительность и широкий частотный диапазон, предпочтительны пьезоэлектрические акселерометры. Для компактности, интеграции в микросхемы и упрощенной электроники выгоднее пьезорезистивные датчики ускорения. Обе технологии производства требуют прецизионной термо- и линейностной калибровки; для повышения точности применяют компенсацию по температуре, демпфирование и адаптивные схемы обработки. Выбор часто определяется целями задачи: диапазон ускорений, частоты, условия эксплуатации и желаемый уровень интеграции в применяемых электронных системах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С./ Микросистемные датчики физических величин: монография в двух частях – М. Техносфера, 2018 – 550 с.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы / Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.: ил.
3. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с
4. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
5. В. Варадан, К. Винои и К. Джозе, "ВЧ МЭМС и их применение", Техносфера, 2004. – 263 стр.
6. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. – 171 с.
7. Сысоева С. МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – №7.
8. Калинкина М.Е., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л., Комарова А.В., Микроэлектромеханические системы и датчики– СПб: Университет ИТМО, 2020. – 75 с.
9. Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: Учеб. пособие. В 2 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. Ч.1. 416 с.
10. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий / С. Козин [и др.] // Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 24–27.

## ГЛАВА 8. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.311

**Голобоков<sup>1</sup> С.В., Бгури<sup>2</sup> Нариман, Наффати<sup>3</sup> Баха, Тихомиров<sup>4</sup> Т.А.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

### РЕАЛИЗАЦИЯ ГИДРОПОТЕНЦИАЛА МЁРТВОГО МОРЯ

**Аннотация.** Рассматривается возможность реализации гидропотенциала Мертвого моря, расположенного ниже уровня мирового океана. Для генерации электрической энергии предложена схема деривационной ГЭС. Рассмотрены варианты прокладки водных каналов из Средиземного и Красное морей, выполнено сравнение разных трасс. Расчетная мощность ГЭС составит 1 ГВт. Выработка ГЭС электрической энергии в объемах 8300 ГВт.ч позволит улучшить энергоснабжение потребителей.

Для реализации проекта в Мертвое море будет организован дополнительно приток 655 млн м<sup>3</sup> морской воды в год. Поступление такого объема позволит остановить падение уровня Мертвого моря и затормозить надвигающуюся экологическую катастрофу. Кроме энергетического фактора, предложенный проект позволяет решить ряд экологических и социально-экономических проблем. Аналогичные проекты предложены правительствами Израиля и королевства Иордания, но без генерации электрической энергии.

**Ключевые слова:** гидропотенциал, гидроэлектростанция, электрическая мощность, деривационный канал, гидротурбина, потери напора, расход воды, перепад уровня, насосная станция, трасса водных каналов

**Golobokov<sup>1</sup> S.V., Bguri<sup>2</sup> Nariman, Naffati<sup>3</sup> Baha, Tikhomirov<sup>4</sup> T.A.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> eltech@pnzgu.ru

### REALIZATION OF THE HYDROPOTENTIAL OF THE DEAD SEA

**Abstract.** The article considers the possibility of realizing the hydropotential of the Dead Sea, located below the level of the world ocean. To generate electric energy, the authors proposed a scheme for a derivational hydroelectric power station. The options for laying water channels from the Mediterranean and the Red Sea are considered, and a comparison of different routes is performed. The estimated capacity of the HPP will be 1 GW. The generation of electric energy by hydroelectric power plants in the amount of 8,300 GWh will improve the energy supply to consumers.

To implement the project, an additional inflow of 655 million m<sup>3</sup> of seawater per year will be organized in the Dead Sea. The arrival of such a volume will make it possible to stop the fall in the Dead Sea level and slow down the impending environmental catastrophe. In addition to the energy factor, the proposed project allows solving a number of environmental and socio-economic problems. Similar projects have been proposed by the Governments of Israel and the Kingdom of Jordan, but without generating electricity.

**Keywords:** hydropotential, hydroelectric power station, electric power, derivation channel, hydro turbine, pressure loss, water flow, level drop, pumping station, water channel route

Мёртвое море – бессточное гиперсолёное озеро на Ближнем Востоке, на границе Израиля и Иордании [1]. Мёртвое море одно из самых солёных водоёмов на нашей планете. Известно в мире как природная лечебница с курортами. Туристы едут на курорты чтобы поправить здоровье, позагорать на солнечных пляжах и увидеть достопримечательности, связанные с библейскими сюжетами. На рис 1 представлен типичный пейзаж.



Рисунок 1 - Мертвое море в наши дни

Водоём расположен на Ближнем Востоке, с запада его воды омывают берег Израиля, а восточное побережье принадлежит Иордании. Котловина Мёртвого моря занимает часть тектонической впадины Эль-Гор (Иорданская рифтовая долина). Впадина протянулась с севера на юг примерно на 300 километров, а её ширина 25 километров.

Расстояние по прямой от побережья средиземного моря до северной части мертвого моря составляет 96 км. От Побережья впадина отделена горным массивом с высотой над уровнем моря до 500 м [2].

Питание Мёртвого моря осуществляется главным образом за счёт поступления вод реки Иордан, впадающей в море на севере, и нескольких небольших, периодически пересыхающих водотоков. Растущее потребление воды в регионе приводит к сокращению притока вод в море. За последние 40 лет приток вод сократился с 1,43 млрд м<sup>3</sup> до 100 млн м<sup>3</sup> в год.

Уровень воды в Мёртвом море на 430 м ниже уровня моря и падает со скоростью примерно 1 метр в год. Количество осадков составляет до 100 мм в год в северной части Мертвого моря и до 50 мм в южной части [1]. Засушливость зоны Мертвого моря обусловлена эффектом дождевой тени в Иудейских горах. Высокая температура и малое количество осадков приводит к сокращению объема и площади зеркала водоема.

В 2010 г уровень воды Мёртвого моря на 424 м ниже уровня мирового океана, побережье озера является самым низким участком суши на Земле. Длина озера – 67 км, ширина – 18 км в самом широком месте, максимальная глубина – 306 м. Объем воды – 114 км<sup>3</sup>. Мёртвое море – это один из самых солёных водоёмов на Земле: Минерализация воды 280 г/кг, плотность воды 1240 кг/м<sup>3</sup> при 25°C. Средняя солёность воды Мёртвого моря составляет 260–300‰, в отдельные годы – до 340‰ [2].

Но у Мертвого моря имеется географическая особенность – разность уровня вод с мировым океаном, которая позволяет рассматриваем потенциал с точки зрения гидроэнергетики с привязкой к рельефу и экономическим потребностям региона. Актуальность проекта обусловлена возрастающим спросом на генерацию электрической мощности и отсутствием месторождений углеводородного топлива. В основном потребности Израиля и королевства Иордании в настоящее время закрывают тепловые и атомные станции. Доля ВИЭ в энергобалансе стран региона неуклонно растет, однако полностью перейти на зеленую энергетику страны не способны.

Цель проекта - провести технико-экономическое обоснование строительства гидроэлектростанции на побережье Мертвого моря.

Задачи проекта:

1. Рассчитать гидропотенциал Мертвого моря.
2. Выбрать схему гидроэлектростанции
3. Выбрать состав гидротехнических сооружений
4. Выбрать трассу прокладки водоканалов.
5. Рассчитать число и мощность гидротурбин.
6. Расчет годового объема генерации электроэнергии
7. Расчет годового притока воды в Мертвое море.
8. Расчет экономических показателей
9. Улучшение экологических показателей.
10. Социально экономические аспекты

Проект строительства ГЭС предполагает использование географического положения и создания напора за счет разности высот 424 м между поверхностью вод Мертвого моря и уровнем воды в Средиземном море [2].

Схема реализации проекта представлена на рис. 2.

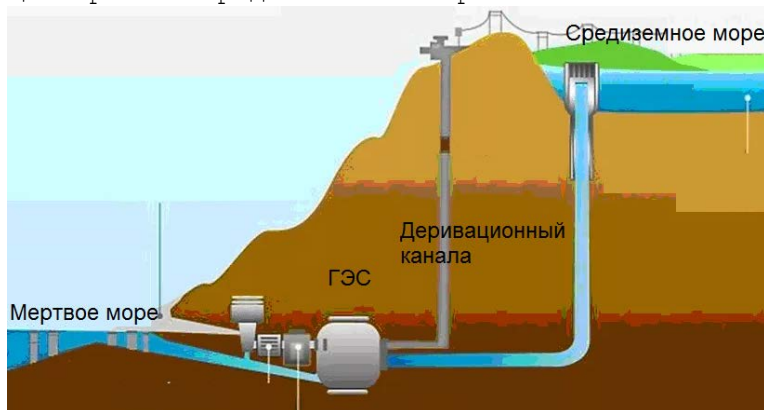


Рисунок 2 - Схема реализации гидропотенциала

Возможны два варианта переброски воды в Мертвое море:

1. Из Красного моря, от порта Акаба через Иорданскую долину.
2. Из Средиземного моря, через горный массив.

Расстояние до Красного моря составляет 240 км. Трасса водного канала пойдет по низменности, по территории Иордании. Расстояние от побережья Средиземного



моря до северной части Мертвого моря по прямой составляет 96 км. От Побережья впадина отделена горным массивом с высотой над уровнем моря до 500 м [2].

Во втором варианте протяженность водных каналов в 2 раза меньше, строительство каналов по территории Израиля будет дешевле. По принципу работы ГЭС относится к горным рекам с большим перепадом высоты и малым расходом воды. Подачу воды из Средиземного моря будет выполнять деривационный канал – герметичные водоводы диаметром 6 м [3]. Схема деривационных каналов ГЭС приведена на рис. 3.

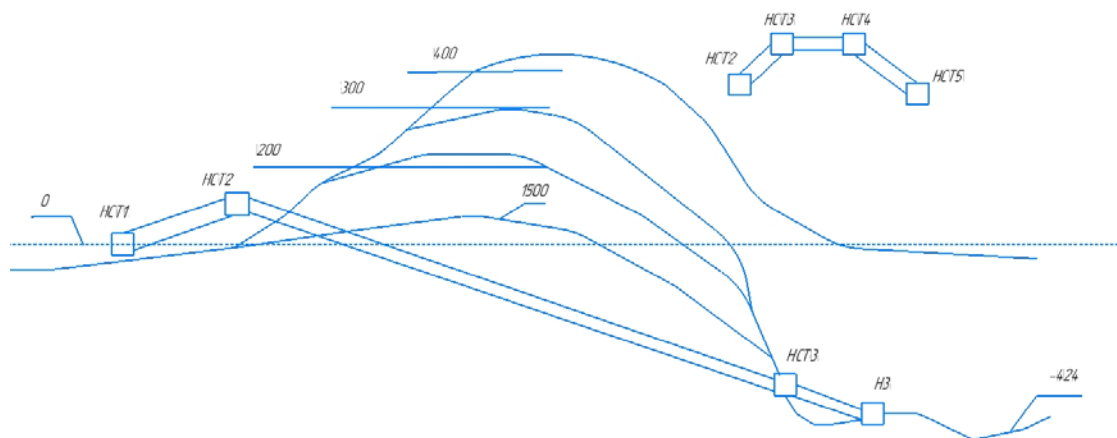


Рисунок 3 - Трасса прокладки водных каналов

Для соединения Средиземного моря и Мертвого моря предлагается 2 варианта. Схема прокладки каналов на местности представлена на рис 4 и 5.



Рисунок 4 - Вариант 1. Северный переход, длина 102 км

Северный переход, южнее г. Иерусалим, через долину реки Дарджа. Максимальная высота гор на трассе водовода составляет 342 м. Недостаток – густонаселенный район, водозаборная станция расположена севернее порта Ашдод. На трассе необходимо поставить 3 насосные станции с перепадом высот до 100 м. Длина трассы по горам с отметкой высот более 150 м составляет 72 км, строительство тоннеля такой длины будет очень дорого.

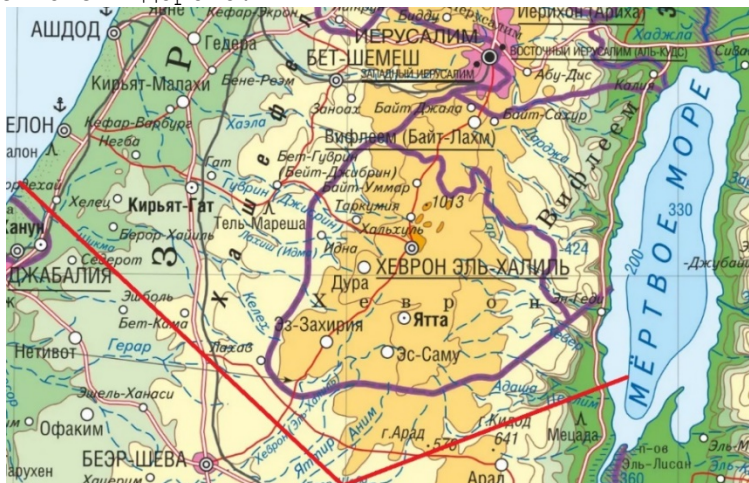


Рисунок 5 - Вариант 2. Южный переход, длина 126 км

Водозаборная станция южнее порта Ашкелон, максимальная высота в горах 262 м, длина тоннеля у п. Арад составит 8 км. Трасса водоводов идет по долине реки Нерлим. Машинный зал ГЭС расположен в южной оконечности моря. Местность вдоль трассы – в основном предгорья. Населенных пунктов и транспортных магистралей немного, препятствий строительству гидротехнических сооружений гораздо меньше.

Возможен вариант прокладки трассы по поверхности гор или строительство тоннеля на отметке не выше 526 м. В первом случае понадобится три насосные станции для заполнения канала. Во втором случае достаточно одной станции. Каждая насосная станция выступает узлом регулирования потока и демпферной камерой [3].

В настоящее время технология строительства высоконапорных трубопроводов с диаметром до 6 м и статическим давлением до 50 атм хорошо отработана и применяется в различных гидроузлах, в основном в горной местности [4]. Часто для прокладки трассы водоводов используют туннели и естественные пещеры. Расчет сечения деривационных каналов гидроэлектростанции в горах представлен ниже.

Деривационный канал работает по принципу сообщающихся сосудов. Забор воды выполняется в Средиземном море на отметке 0. Максимальная высота по 2 варианту трассы составляет 526 м. Машинный зал расположен на отметке минус 420 м. Подача воды из Средиземного моря в Мертвое море идет самотоком. Насосные станции необходимы для заполнения водных каналов и компенсации утечек при разгерметизации каналов. На побережье Мертвого моря на отметке - 414 м относительно мирового океана будет построен машинный зал с несколькими гидроагрегатами.

Выполним расчеты мощности ГЭС для технико-экономического обоснования проекта [4]. С учетом возможного колебания уровня воды в море и высоты гидротехнических сооружений принимаем перепад высоты между заборной станцией и машинным залом 420 м.

Номинальная мощность одного гидроагрегата составляет 150 МВт. КПД гидротурбины максимальный – 70 %, средний для режимов эксплуатации – 60 %. Механическая мощность одного канала составит 250 МВт.

Механическая мощность потока воды в канале

$$N = \rho * g * H * Q$$

Откуда выразим расход воды в сечении канала

$$Q = N / (\rho * g * H) = 250 * 10^6 / (10^3 * 10 * 400) = 60 \text{ м}^3/\text{с}$$

Для компенсации потерь принимаем расход на 20 % больше,

Объемный расход

$$Q = 60 * 1,2 = 72 \text{ м}^3/\text{с}$$

Объемный расход одного канала

$$Q = S * v = v * \pi * d^2 / 4$$

Максимальную скорость потока без учета гидродинамического сопротивления в трубопроводах можно найти по формуле Бернулли:

$$v = (2 * g * h)^{0,5} = (2 * 10 * 400)^{0,5} = 90 \text{ м/с}$$

За счет гидродинамического сопротивления труб на каждом участке водных каналов будет перепад давления и скорость потока будет снижаться. Принимаем скорость потока в диффузоре на входе в гидротурбину равной половине от теоретически возможной, равной 50 м/с. Рассчитаем диаметр выходного канала диффузора.

$$d = (4Q / v * \pi)^{0,5} = (4 * 60 / 50 * \pi)^{0,5} = 1,27 \text{ м.}$$

Для скорости 30 м/с найдем максимальный диаметр трубопровода

$$d_{\text{max}} = (4Q / v * \pi)^{0,5} = (4 * 60 / 30 * \pi)^{0,5} = 1,67 \text{ м.}$$

Выполним расчет потери напора водных каналов ГЭС.

Для расчета потери напора и выбора сечения водного канала воспользуемся пакетом прикладных программ [5]. Копия листинга расчета потерь напора на 1 км длины водовода представлена на рис. 6.

| Введите исходные данные                                             |               |
|---------------------------------------------------------------------|---------------|
| Внутренний диаметр трубопровода                                     | 6000 мм       |
| Длина трубопровода                                                  | 1000 м        |
| Расход жидкости                                                     | 4000000 л/мин |
| Перекачиваемая жидкость                                             | Вода          |
| Кинематическая вязкость                                             | 0,000001 м²/с |
| Материал внутренней стенки трубопровода                             | Бетон         |
| Шероховатость внутренней поверхности трубы                          | 0,8 мм        |
| Шероховатость внутренней поверхности трубы                          |               |
| 0,8 мм                                                              |               |
| Ускорение свободного падения в точке измерения                      |               |
| 9,81 м/с²                                                           |               |
| Рассчитать                                                          |               |
| Результаты                                                          |               |
| Площадь сечения трубопровода: 28.259999999999998 м²                 |               |
| Относительная шероховатость трубопровода: 0.00013333333333333334 мм |               |
| Скорость течения жидкости: 2.359046945034206 м/с                    |               |
| Число Рейнольдса: 14154281.670205237                                |               |
| Режим течения: турбулентный (высокие потери, точный расчет)         |               |
| Коэффициент гидравлического трения: 0.011925335590106369            |               |
| Потери напора по длине: 0.5637590449640945 м.в.ст                   |               |

Рисунок 6 - Использование пакета программ Simulink

Потери напора по длине составят 0,56 м на 1 км трассы водовода. Для южного варианта длина трассы составляет 126 км. Следовательно, потери напора на вводе в гидротурбину составляют

$$\Delta P = 0,56 * 126 = 70 \text{ м.}$$

Действительный напор воды при перепаде 420 м составит

$$P = 420 - 70 = 350 \text{ м.}$$

Найдем фактическую мощность гидротурбины

$$N = \rho * g * H * Q = 10^3 * 10 * 330 * 72 = 252 \text{ МВт}$$

Полученное значение близко к заданному в ТЗ, расчет считаем законченным.

Выполним расчет годового объема генерации

$$W_{\text{год}} = K_{\text{тг}} * P_{\text{уст}} * t = 0,95 * 1000 * 8760 = 8322000 \text{ МВтч}$$

Стоимость выработанной электроэнергии

$$C = \Pi * W_{\text{год}} = 280 \text{ USD/МВтч} * 8322000 = 2330 \text{ млн USD}$$

Прибыль составит примерно 30 %

$$\Pi = 700 \text{ млн USD}$$

Срок окупаемости проекта

$$T = K/\Pi = 3000 / 700 = 4,3 \text{ лет.}$$

Для каждого гидроагрегата мощностью 150 МВт необходимо построить бетонный канал длиной 126 км. Диаметр канала 6 м, диаметр диффузора на входе в турбину 2 м. Для ГЭС мощностью 1 ГВт потребуется 7 гидроагрегатов. Трасса водоводов будет содержать 7 каналов.

Рассчитаем расход воды при полной загрузке ГЭС.

$$\text{Расход воды одного канала } Q = 72 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{Объем воды в час } V_1 = 72 * 3600 = 259800 \text{ м}^3 = 260 \text{ тыс м}^3.$$

$$\text{Объем воды в месяц } V_2 = 30 * 260 = 7800 \text{ тыс м}^3 = 7,8 \text{ млн м}^3.$$

$$\text{Объем воды одного канала в год } V_3 = 12 * 7,8 = 93,6 \text{ млн м}^3.$$

$$\text{Объем воды в год ГЭС } V_4 = 7 * 93,6 = 655 \text{ млн м}^3.$$

Поступление такого объема воды по деривационным каналам позволит остановить или замедлить высыхание Мертвого моря. Кроме чисто энергетического проект имеет явно выраженный экологический эффект. Поступление дополнительных объемов воды затормозит процессы изменения ландшафта, сохранит уникальные симбиоз флоры и фауны в условиях субтропического климата. Реализация проекта дает важный социально-экономический эффект по устойчивому развитию территории в условиях дефицита энергоресурсов и их влияния на окружающий мир.

#### ВЫВОДЫ

Использование гидропотенциала перепада уровня мирового океана и Мертвого моря соответствует концепции Зеленой экономики

Строительство 7 деривационных каналов диаметром 6 м и длиной 126 км обеспечивает круглосуточную работу 7 гидроагрегатов.

Генерация электроэнергии составит примерно 8322 ГВтч в год при установленной мощности ГЭС 1000 МВт.

Возможны 2 варианта прокладки трассы – северный переход и южный. Длина южного перехода и перепад высот меньше, район менее заселен и насыщен транспортными магистралями, стоимость проекта будет меньше.

Годовой приток воды через каналы ГЭС 655 млн м<sup>3</sup>, компенсирует убывание уровня воды Мертвого моря на сегодняшний день на 1 м в год.

Реализация проекта и работа ГЭС имеет социально-экономический эффект, сохраняет бальнеологический статус Мертвого моря и окружающий ландшафт для туристической отрасли.

Срок реализации проекта – 12 лет, срок окупаемости – 4 года.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курорты и достопримечательности на побережье знаменитого водоёма. – URL/ <https://experience.tripster.ru/articles/otdyh-na-myortvom-more/>
2. Мертвое море. – URL/ <https://bigenc.ru/c/miortvove-more-19fba0>
3. Февралев, А. В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках [Текст]: Учебное пособие / А. В. Февралев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2014. – 181 с.
4. ПРИКАЗ МИНЭНЕРГО РФ «Об утверждении Методических указаний по технологическому проектированию гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций» от 16 августа 2019 года N 857.
5. Онлайн-калькулятор потерь напора. – URL/ <https://zenova.ru/articles/onlayn-kalkulyator-poter-napora-v-zavisimosti-ot-rashoda-zhidkosti-i-secheniya-truboprovoda>



УДК 621.3.052.5

**Бростилова<sup>1</sup> Т.Ю., Кузнецов<sup>2</sup> А.С., Коптева<sup>3</sup> Т.В.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3</sup> eltech@pnzgu.ru

### **АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ ДЛЯ УДАЛЕННЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

**Аннотация.** Производится анализ технических и экономических аспектов создания выпрямительной подстанции для энергоснабжения потребителей в удалённых труднодоступных районах. Анализируются современные схемы выпрямителей, особенности работы в условиях низких температур и отсутствия централизованной сети электроснабжения. Оцениваются перспективы использования модульных конструкций и интеграция в сеть возобновляемых источников энергии для повышения надёжности. Показано, что применение полупроводниковых преобразователей с микропроцессорным управлением позволяет снизить эксплуатационные затраты. На основе анализа делается вывод о целесообразности развития распределённой генерации с выпрямительными подстанциями для арктических и северных территорий.

**Ключевые слова:** выпрямительная подстанция, удалённые территории, полупроводниковые преобразователи, автономное электроснабжение, надёжность, модульные конструкции, возобновляемые источники энергии

**Brostilova<sup>1</sup> T.Yu., Kuznetsov<sup>2</sup> A.S., Kopteva<sup>3</sup> T.V.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3</sup> eltech@pnzgu.ru

### **PROSPECTS ANALYSIS OF RECTIFIER SUBSTATION DESIGN FOR REMOTE HARD-TO-REACH AREAS**

**Abstract.** This article analyzes the technical and economic aspects of creating a rectifier substation for power supply to consumers in remote, hard-to-reach areas. Modern rectifier circuits are analyzed, as well as the features of operation at low temperatures and in the absence of a centralized power supply network. The prospects of using modular structures and integration into a network of renewable energy sources to increase reliability are being evaluated. It is shown that the use of semiconductor converters with microprocessor control reduces operating costs. Based on the analysis, it is concluded that it is advisable to develop distributed generation with rectifier substations for the Arctic and northern territories.

**Keywords:** rectifier substation, remote areas, semiconductor converters, autonomous power supply, reliability, modular designs, renewable energy sources

Электроэнергетика удалённых и труднодоступных территорий (районов Крайнего Севера, Арктики, высокогорных и зон «вечной мерзлоты») сталкивается с рядом специфических проблем в частности - отсутствие централизованных сетей электроснабжения, экстремальные климатические условия, высокая стоимость доставки топлива и сложность обслуживания оборудования обусловленная климатом. Одним из перспективных вариантов решения проблем является использование выпрямительных подстанций, которые преобразуют переменный ток от локальных источников энергии (дизельных, газопоршневых, ветро- или гидрогенераторов) в стабилизированный постоянный ток для питания потребителей постоянного напряжения, систем телекоммуникаций, катодной защиты трубопроводов и накопителей энергии [1, с. 45].

Современные выпрямительные подстанции для удалённых объектов должны отвечать повышенным требованиям к надёжности, ремонтпригодности и энергоэффективности. Анализ литературных данных показывает, что традиционные схемы с неуправляемыми выпрямителями (трёхфазные мостовые) обладают высокой перегрузочной способностью, но не позволяют регулировать выходное напряжение и имеют высокий уровень гармоник [2, с. 112; 3, с. 89]. Более совершенным решением для изолированных систем являются управляемые выпрямители на базе IGBT-транзисторов или тиристоров с широтно-импульсной модуляцией, которые обеспечивают стабилизацию напряжения и снижают искажения тока [4, с. 56].

Особое внимание при проектировании выпрямительных подстанций для труднодоступных территорий следует уделять климатическому исполнению. Диапазон рабочих температур должен составлять не менее  $-50...+40$  °С, а оборудование должно быть защищено от конденсата, инея и механических воздействий. В работах [5, с. 77] показано, что использование термостатированных контейнеров и подогрева силовых модулей позволяет сохранять работоспособность выпрямителей в условиях Крайнего Севера без постоянного присутствия обслуживающего персонала.

Экономическая целесообразность применения выпрямительной подстанции для удалённой территории определяется в первую очередь значительным сокращением расхода топлива. При замене нерегулируемого выпрямителя на управляемый с функцией максимального использования возобновляемой энергии (ветер, солнце) теоретическая экономия дизельного топлива может достигать 30–40 % [6, с. 202]. Кроме того, модульная архитектура позволяет постепенно наращивать мощность подстанции, что снижает первоначальные капитальные затраты.

В качестве примера успешной реализации можно привести выпрямительную подстанцию «Полярная», установленную в Ямало-Ненецком автономном округе. Она

включает два параллельно работающих 12-пульсных выпрямителя с автоматическим переключением на резерв. Опыт эксплуатации подтвердил, что наработка на отказ такого оборудования превышает 25 000 часов [7, с. 134].

Основным сдерживающим фактором остаётся высокая стоимость полупроводниковых ключей и систем управления, а также компенсация внешних климатических факторов. Однако тенденция к снижению цен на силовую электронику, а также развитие программ государственной поддержки энергоснабжения северных территорий делают проекты выпрямительных подстанций всё более привлекательными [8, с. 91].

Подводя итог, проведенный анализ перспектив проектирования выпрямительных подстанций для удалённых труднодоступных территорий показывает, что принципиально такие решения технически реализуемы и могут быть экономически обоснованы при условии учёта климатических факторов, применения модульных конструкций и интеграции с возобновляемыми источниками энергии. Дальнейшие исследования должны быть направлены на удешевление технологий интеграции возобновляемых источников электроэнергии и создание оборудования для различных диапазонов мощностей (10–500 кВт), а также разработку адаптивных алгоритмов управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробков В.В., Малышев В.С. Автономные системы электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии // Энергетик. 2021. № 3. С. 44–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45678901> (дата обращения: 05.04.2026).
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 280 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovy-silovoy-elektroniki> (дата обращения: 05.04.2026).
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Полупроводниковые преобразователи в системах электроснабжения // Электротехника. 2019. № 7. С. 87–93. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38567234> (дата обращения: 05.04.2026).
4. Бурмистров А.В., Шаров Ю.В. Многоуровневые преобразователи для распределённой энергетики // Известия вузов. Электромеханика. 2020. № 2. С. 54–61. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogourovnevye-preobrazovateli-dlya-raspredelennoy-energetiki> (дата обращения: 05.04.2026).
5. Герасимов Д.Н., Степанов С.А. Особенности эксплуатации силового электрооборудования в условиях Арктики // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2022. № 4. С. 75–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49871234> (дата обращения: 05.04.2026).
6. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Повышение эффективности автономных систем электроснабжения на основе гибридных выпрямителей // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 10–12. С. 200–208. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-avtonomnyh-sistem-elektrosnabzheniya-na-osnove-gibridnyh-vypryamiteley> (дата обращения: 05.04.2026).
7. Михеев А.П., Ковалёв О.В. Опыт создания выпрямительных подстанций для удалённых нефтегазовых промыслов // Энергия единой сети. 2020. № 5. С. 130–137. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43789123> (дата обращения: 05.04.2026).
8. Шполянский А.Ю., Митрофанов С.В. Экономическая эффективность применения полупроводниковых преобразователей в северном завозе топлива // Региональная экономика: теория и практика. 2021. № 6. С. 89–96. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-effektivnost-primeneniya-poluprovodnikovyyh-preobrazovateley-v-severnom-zavoze-topliva> (дата обращения: 05.04.2026).

УДК 621.311

**Алексеев<sup>1</sup> А.А., Гусев<sup>2</sup> Ю.А., Егоров<sup>3</sup> Н.А.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> aa.alekseev@inbox.ru

<sup>2</sup> gusev.ura229@yandex.ru

<sup>3</sup> hukita23@mail.ru

## **ЯВЛЕНИЕ ОБРАТНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ КАК НЕГАТИВНЫЙ ФАКТОР ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ**

**Аннотация.** Рассмотрена проблема обеспечения безопасности оперативного персонала при выполнении операций с разъединителями в случае подачи напряжения на поврежденные элементы в результате возникновения явления обратной трансформации. Рассмотрены физические основы возникновения явления, по результатам моделирования проведен анализ электрических величин при различных источниках напряжения. В заключении сделан вывод о необходимости проведения мероприятий, исключающих возможность возникновения обратной трансформации при выполнении переключений, и совершенствовании нормативно-технических документов, регламентирующих переключения в электроустановках.

**Ключевые слова:** обратная трансформация, безопасность оперативного персонала, переключения в электроустановках, трансформатор напряжения, разъединитель

**Alekseev<sup>1</sup> A.A., Gusev<sup>2</sup> Y.A., Egorov<sup>3</sup> N.A.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> aa.alekseev@inbox.ru

<sup>2</sup> gusev.ura229@yandex.ru

<sup>3</sup> hukita23@mail.ru

## **THE PHENOMENON OF REVERSE VOLTAGE TRANSFORMATION AS A NEGATIVE FACTOR FOR THE SAFETY OF OPERATIONAL PERSONNEL WHEN PERFORMING SWITCHING IN ELECTRICAL INSTALLATIONS.**

**Abstract.** The article addresses the issue of ensuring the safety of operational personnel when performing operations with disconnectors in cases where voltage is applied to damaged elements due to the occurrence of reverse transformation. The authors examine the physical principles behind this phenomenon and, based on simulation results, analyse electrical quantities under various voltage sources. In conclusion, it is emphasised that measures must be implemented to eliminate the possibility of reverse transformation during switching operations. Additionally, there is a need to improve regulatory and technical documents in the field of electric power engineering – specifically, to enhance the description of operations involving secondary circuits of voltage transformers during the response to emergencies at energy facilities.

**Keywords:** reverse transformation, operational personnel safety, switching operations in electrical installations, voltage transformer, disconnector

Учитывая высокую степень рисков, сопровождающих процесс выполнения переключений в электроустановках, обеспечение безопасности работников объектов энергетики является одной из приоритетных задач предприятий энергетического комплекса. В частности, Правилами предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики [5], установлена приоритетность действий диспетчерского и оперативного персонала по обеспечению безопасности персонала при ликвидации аварий.

Одним из негативных факторов, создающих угрозу безопасности оперативного персонала при выполнении оперативных переключений в электроустановках, является возможность возникновения явления обратной трансформации напряжения.

Потенциальными источниками обратной трансформации напряжения являются:

обмотки низшего и среднего классов напряжения силовых трансформаторов, питаемые по сетям кольцевания;

резервные источники снабжения электрическое энергии, используемые потребителями и сетевыми организациями (дизель-генераторные установки, передвижные установки обратной трансформации);

трансформаторы напряжения (ТН).

Обратная трансформация – это режим работы трансформатора, при котором напряжение, поданное на вторичную обмотку, преобразуется в напряжение, близкое к номинальному, на первичной обмотке.

Физическая сущность явления обратной трансформации основана на принципе обратимости работы трансформаторов. Любой трансформатор способен работать как в прямом, так и в обратном направлении за счет явления электромагнитной индукции, которое заключается в возникновении электрического тока, электрического поля или электрической поляризации при изменении магнитного поля во времени или при движении материальной среды в магнитном поле.

Обратная трансформация создает возможность подачи напряжения на поврежденные элементы подстанций (ПС) и, как следствие, угрозу оперативному персоналу при осуществлении коммутаций разъединителями по исключению повреждённых элементов, которая будет сопровождаться возникновением коротких замыканий (КЗ) и, как следствие, дуговых разрядов.

Разъединитель способен размыкать и замыкать цепь при малом токе или малом изменении напряжения на выводах каждого из его полюсов. Правилами переключений в электроустановках [4] допускается отключение и включение разъединителями без превышения допустимых величин коммутуемых токов, указанных в инструкции по эксплуатации: ТН, нейтралей и намагничивающего тока силовых трансформаторов, зарядных токов линий и шин и т.д. Также при выполнении операций разъединителями с ручным приводом, должны быть приняты меры, исключающие самопроизвольное или ошибочное включение выключателей присоединений, при включении которых разъединителем будет коммутироваться недопустимый ток. Максимальные значения токов отключения наиболее распространенных марок разъединителей 110-220 кВ находятся в диапазоне от 1 до 4 А, в зависимости от характера отключаемого тока. При этом в действующих нормативно-технических документах с одной стороны не предусмотрена возможность коммутаций разъединителями токов КЗ, с другой – отсутствует необходимость отключения трансформаторов напряжения по стороне низкого напряжения перед операциями с разъединителями по исключению поврежденных элементов сети.

Для проверки условий возникновения токов короткого замыкания (КЗ) и высокого напряжения, связанных с явлением обратной трансформации, рассмотрим два источника напряжения – дизель-генераторную установку 0,4 кВ мощностью 630 кВА и трансформатор напряжения 110 кВ типа НКФ.

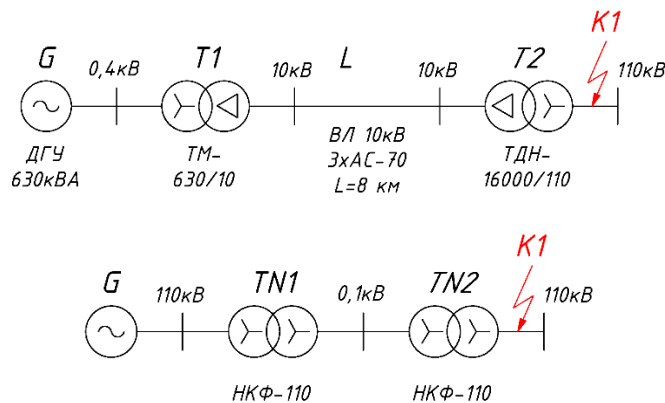


Рисунок 1 - Структурные схемы исследуемых участков электрической сети

Для проведения исследования была разработана модель участка электрической сети с применением программного комплекса **Matlab**.

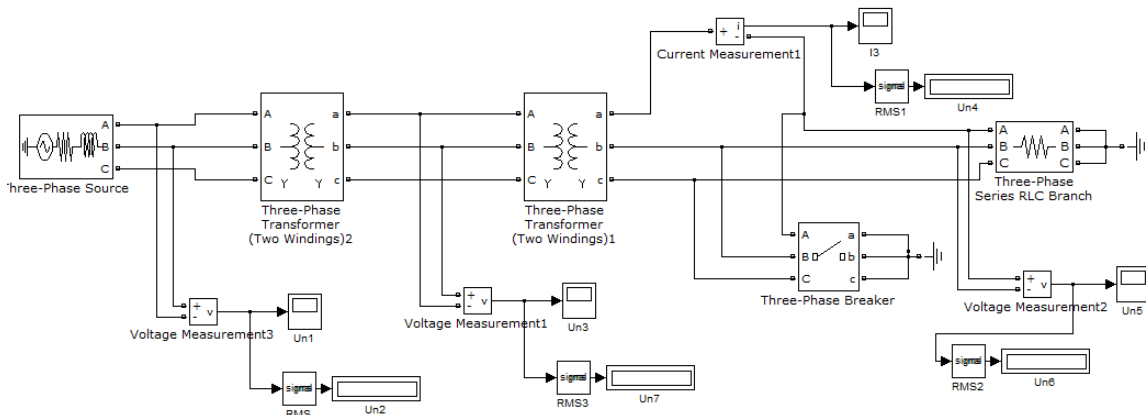


Рисунок 2 - Схема моделирования процесса обратной трансформации от трансформатора напряжения

По результатам моделирования исследуемых участков сети были получены следующие значения:

в сети с источником питания в виде ДГУ действующее значение трехфазного тока КЗ составило 28,3 А;

в сети с источником питания в виде ТН действующее значение трехфазного тока КЗ составило 0,5 А, при этом значение линейного напряжения до момента возникновения КЗ составило 106 кВ.

**Выводы.** Возможность возникновения явления обратной трансформации носит в значительной степени вероятностный характер, однако, возможно создание схемно-режимных ситуаций, при которых источниками обратной трансформации являются сети кольцевания или потребительские резервные источники снабжения электрической

энергией. В таких случаях, при подаче напряжения посредством обратной трансформации на поврежденные элементы электрической сети, возможно возникновение значительных токов КЗ, создающих угрозу безопасности персонала при операциях с разъединителями.

Для определения значения токов КЗ в конкретной схемно-режимной ситуации необходимо значительный объем данных, а также проведение достаточно сложных инженерно-технических расчетов, что не представляется возможным в условиях выполнения оперативных переключений в электроустановках при ликвидации аварии. Поэтому для исключения коммутации разъединителями токов КЗ необходимо перед коммутацией разъединителями участков электрической цепи, содержащий поврежденный элемент, принимать меры, препятствующие подаче напряжений на данный участок со всех возможных сторон подачи напряжения, в том числе в результате возникновения обратной трансформации:

отключение и снятие оперативного тока с трансформаторного (-ых) выключателя (-ей), даже если в текущей схемно-режимной ситуации напряжение на обмотках среднего и низшего класса напряжения отсутствует;

отключение и снятие оперативного тока с линейных выключателей даже если напряжение на линиях в текущей схемно-режимной ситуации отсутствует.

Отключение ТН со стороны обмоток низкого напряжения целесообразно при выполнении плановых переключений по выводу в ремонт элементов электрической сети, к которым он подключен. Это обусловлено тем фактом, что при некоторых схемах организации вторичных цепей напряжения на ПС возможна подача напряжения со вторичных обмоток ТН, находящегося в работе, на вторичные обмотки отключенного ТН, что может привести к появлению высокого потенциала на первичной обмотке ТН, опасного для человека.

Ввиду особенностей конструкции и назначения, обмотки ТН обладают малой мощностью и большим сопротивлением. По результатам проведенного исследования, можно сделать вывод, что при появлении обратной трансформации через обмотки ТН 110 кВ на поврежденный элемент электрической сети, возникаемый ток КЗ, даже при трехфазном коротком замыкании, будет иметь относительно малое значение, не превышающее максимально допустимых коммутационных свойств разъединителя, и, соответственно, потенциально не предоставляет угрозу для оперативного персонала при выполнении переключений. Исходя из этого, в целях сокращения времени переключений при ликвидации аварий, необходимо рассмотреть вопрос о внесении в нормативно-технические документы, регламентирующие порядок переключений в электроустановках, возможность не принимать меры, препятствующие подаче напряжений со стороны ТН, перед коммутацией разъединителями участков электрической цепи, содержащих поврежденный элемент. Однако, для этого необходимо проведение дополнительных исследований для различных схемно-режимных ситуаций, классов напряжений, с различными элементами сети, чтобы полностью исключить угрозу для безопасности оперативного персонала.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вавин В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи – 1977.
2. Лансберг А. А., Панфилов А. А., Виноградов А. В. Анализ возможных способов несанкционированной подачи напряжения в электрических сетях 0,4-10 кВ и последствий от этого // Научный журнал молодых ученых. 2022. №2 (27).
3. Кислицын А.Л. Трансформаторы: Учебное пособие по курсу «Электромеханика»- Ульяновск: УлГТУ, 2001. - 76 с.
4. Правила переключений в электроустановках, утвержденные приказом Минэнерго России от 13.09.2018 №757.
5. Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики, утвержденные приказом Минэнерго России №548 от 12.07.2018 г.

УДК 007.51

**Болвашенков<sup>1</sup> И.В., Мельников<sup>2</sup> Д.А., Терехин<sup>3</sup> М.А., Иващенко<sup>4</sup> А.В.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

<sup>3,4</sup> Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> anton.ivashenko@gmail.com

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ ПОСТАВОК**

**Аннотация.** Представлена модель системы управления медицинской логистической цепью поставок, предназначенная для совершенствования производственной системы медицинских изделий и медицинской техники за счет балансировки серийного и единичного производства. При построении системы управления по аналогии с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором предлагается реализовать компоненты прогнозирования спроса, управления запасами и собственно балансировки серийного и единичного производства. Реализация предложенных компонентов основана на применении технологий искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** организация производства, медицинское приборостроение, высокотехнологическая медицина, персонализированная медицина, управление цепями поставок

**Bolvashenkov<sup>1</sup> I.V., Melnikov<sup>2</sup> D.A., Terekhin<sup>3</sup> M.A., Ivashchenko<sup>4</sup> A.V.**

<sup>1,2</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

<sup>3,4</sup> Samara State Medical University, Samara, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> anton.ivashenko@gmail.com

### **MEDICAL SUPPLY CHAIN MANAGEMENT SYSTEM**

**Abstract.** A model of a medical logistics supply chain management system is presented, designed to improve the production system of medical products and medical equipment by balancing batch and single-piece production. In constructing the management system by analogy with a proportional-integral-derivative controller, it is proposed to implement components for demand forecasting, inventory management, and the actual balancing of batch and single-piece production. The implementation of the proposed components is based on the use of artificial intelligence technologies.

**Keywords:** production organization, medical device engineering, high-tech medicine, personalized medicine, supply chain management

Современные тенденции в здравоохранении связаны с развитием высокотехнологичной медицины, что в свою очередь требует новых подходов по организации производства медицинских изделий и медицинской техники. Основные сложности в этой области заключаются в реализации персонализированных медицинских услуг [1], когда необходимо найти рациональный баланс между оптимальной организацией серийного производства и изготовлением комплектующих индивидуально под заказ каждого пациента. Таким образом, актуальной является задача совершенствования производственных систем в области изготовления медицинских изделий и медицинской техники с учетом требований персонализированной медицины за счет внедрения информационных технологий планирования и управления цепочками поставок.

Основные методы и средства оптимизации производственных систем и контроля качества продукции базируются на положениях теории организации производства [2, 3] и предусматривают широкое внедрение информационных технологий и технологий искусственного интеллекта в соответствии с парадигмой Индустрии 4.0. Важной задачей модернизации производственной системы в настоящее время является автоматизация контроля качества продукции [4, 5], что особенно актуально для отрасли здравоохранения. Производство медицинских изделий предусматривает специальную сертификацию и контроль качества, в связи с чем, необходима реализация и соблюдение единой системы стандартов всеми участниками цепи поставок.

Внедрение концепции Индустрии 4.0 предусматривает активное использование цифровых программных платформ для организации взаимодействия предприятий, образующих единую производственную систему. С учетом специфики такого взаимодействия в высокотехнологичном здравоохранении, а также особенностей сочетания серийного и штучного (единичного) производства, была предложена модель медицинской логистической цепи поставок MPL (Medical Party Logistics), адаптирующей механизмы управления цепочками поставок для отрасли современного здравоохранения.

На основании обобщения опыта организации логистической цепи поставок и управления производством медицинских изделий была предложена система управления на базе регулятора с тремя комплектующими: интеллектуальное прогнозирование спроса, интеллектуальное управление запасами и балансировка серийного и единичного производства. Структура системы управления представлена на Рис. 1.

Составляющие подсистемы выбраны по аналогии с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором. Управление запасами является в данном случае ключевым компонентом, учитывающим обратную связь, и позволяет компенсировать отклонения производительности производственной системы от заданного значения. В этом смысле компонент действует по аналогии с пропорциональным звеном регулятора.

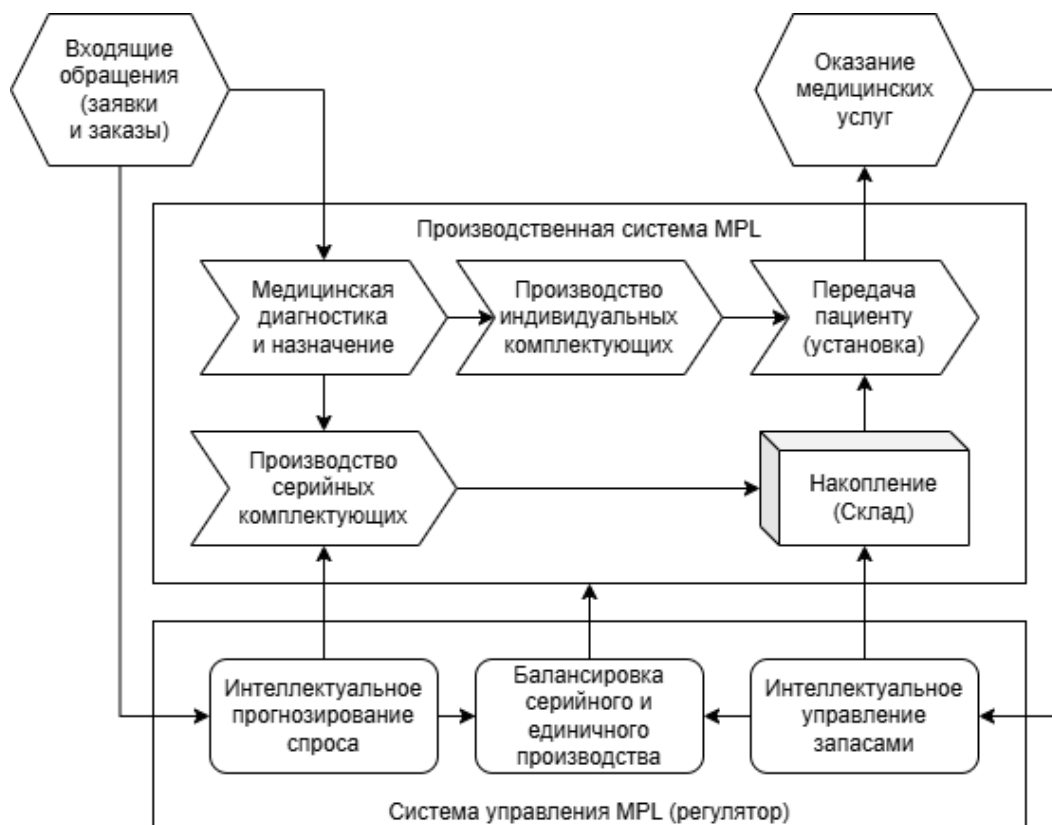


Рисунок 1 - Система управления медицинской логистической цепью поставок

Балансировка серийного и единичного производства позволяет противодействовать отклонению производственной системы в сторону серийного или индивидуального производства. Действительно, перестройка системы на серийное производство позволит обеспечить высокую производительность, но перестанет удовлетворять требованиям персонализированной медицины, а переход на индивидуальные заказы обеспечит высокую подверженность влиянию колебаний спроса и предложения. В этом смысле данный компонент выполняет функции интегрирующей составляющей регулятора.

Наконец, прогнозирование спроса обеспечивает устойчивость системы по отношению к различным отклонениям, вызванным внешними возмущениями или запаздываниями, по аналогии с дифференцирующим звеном.

В рамках реализации компонентов системы управления было разработано программное обеспечение, выполняющее функции прогнозирования и моделирования производственной системы в рамках общей цифровой платформы мониторинга и поддержки принятия решений. Для прогнозирования спроса наиболее целесообразно использовать искусственные нейронные сети, позволяющие динамически обобщить статистику колебаний спроса на медицинские услуги и требующиеся для их оказания устройства и изделия, и реализовать прогноз спроса на краткосрочный и долгосрочный период по оптимистичному, пессимистичному и реалистичному сценариям.

Управление запасами является классической задачей организации производства, при котором для анализа обратной связи необходимо сопоставить данные по результативности оказания медицинских услуг, колебания спроса на них и возможности производственной системы с учетом складских запасов и объемов незавершенного производства. Для решения этой задачи была разработана имитационная модель на основе положений теории ограничений, которую можно конфигурировать под особенности и условия функционирования конкретной производственной системы.

Целью балансировки серийного и единичного производства является поиск рациональной пропорции в привлечении различных производственных предприятий, занимающихся производством комплектующих и сборочным производством с учетом возможностей имеющегося производственного оборудования. Анализ различных технологий реализации программных комплексов для производственного планирования показал перспективы решения этой задачи с использованием мультиагентных технологий.

В рамках мультиагентной модели каждый участник процесса взаимодействия моделируется с помощью программного агента, обладающего индивидуальными целями, ресурсами и ограничениями. Процесс планирования в данном случае представляется имитационным моделированием взаимодействия программных агентов, в ходе которого они вынуждены достигать компромисса за счет совместных уступок. Достоинством

такого подхода является возможность адаптивного планирования в условиях неопределенности, а недостатком – склонность к достижению локальных оптимумов.

В случае моделирования взаимодействия участников цепи поставок мультиагентная модель ограничена возможностями известных участников рынка, а логика достижения компромисса для каждого агента может быть рационально вычислена на основе текущих показателей эффективности. В качестве алгоритма поиска коллективного компромисса был использован метод аукциона. Предложенное программное обеспечение позволяет моделировать процесс взаимодействия участников медицинской логистической цепи поставок и находить рациональный баланс между привлечением преимущественно серийных производителей и небольших научно-производственных предприятий единичного производства.

Предложенная в статье система управления медицинской логистической цепью поставок позволяет реализовать аналог пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора для обеспечения высокой производительности в условиях неопределенности рынка медицинской техники.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дедов И.И., Тюльпаков А.Н., Чехонин И.П. и др. Персонализированная медицина: современное состояние и перспективы // Вестник РАМН. 2012. №12. С. 4-12
2. Организация производства и управление предприятием: Учебник. 3-е изд - Туровец О.Г., Родионова В.Н., Попов В.Н. и др. Инфра-М (Infra-M) 2026 – 506 с.
3. Организация производства: учебник и практикум для среднего профессионального образования / под редакцией Л.С. Леонтьевой, В.И. Кузнецова. - Москва: Издательство Юрайт, 2026. - 279 с.
4. Королев П.С. Разработка программного обеспечения для оценки "коэффициента качества производства" радиотехнических устройств непилотируемых космических аппаратов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2020. – Т. 2. – С. 291 – 294
5. Буцкий Д.О., Цветков В.Э., Королев П.С., Полесский С.Н., Ландер Л.Б., Мкртчян Г.А., Зубрильцев Е.Е., Суслова А.А., Мешочков Д.М. Обзор и анализ современных CAQ-систем для управления качеством технологического процесса на предприятиях // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2025. – Т. 1. – С. 103 – 106
6. Иващенко А.В., Волвашенков И.В. Модель логистической цепи поставок для высокотехнологичной персонализированной медицины // Современные наукоемкие технологии. - № 9. - 2025. с. 63 – 70



УДК 004.89:62-52

**Zhashkov<sup>1</sup> A.A., Mikheev<sup>2</sup> M.Yu., Pepel<sup>3</sup> L.N.M., Kuvshinova<sup>4</sup> E.V.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

<sup>4</sup> Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> zhashkov.artem@gmail.com

<sup>2</sup> mix1959@gmail.com

<sup>3</sup> nadiya.mix@gmail.com

<sup>4</sup> kuvshinova793@gmail.com

#### INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS INTO CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

**Abstract.** The article examines the architectural and algorithmic aspects of integrating artificial intelligence methods into cyber-physical systems. It analyzes the five-level 5C architecture, mechanisms for developing digital twins, and distributed computing loops. Approaches to the application of machine learning for predictive control, adaptive optimization, and fault diagnosis are systematized. Critical limitations are identified, including the high computational resource requirements of neural-network models, adversarial vulnerability, and the lack of formal verifiability. Methodological solutions are proposed, including model quantization, federated learning, hybrid architectures with symbolic reasoning, and explainable artificial intelligence methods. The need to develop standardized certification procedures for intelligent control loops is demonstrated. Further research directions are formulated, focusing on the development of cyber-physical systems that are robust to data drift and external disturbances and incorporate elements of continuous self-learning.

**Keywords:** cyber-physical systems, artificial intelligence, machine learning, digital twin, verification

**Жашков<sup>1</sup> А.А., Михеев<sup>2</sup> М.Ю., Пепель<sup>3</sup> Л.Н.М., Кувшинова<sup>4</sup> Е.В.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

<sup>4</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> zhashkov.artem@gmail.com

<sup>2</sup> mix1959@gmail.com

<sup>3</sup> nadiya.mix@gmail.com

<sup>4</sup> kuvshinova793@gmail.com

#### ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**Аннотация.** Рассматриваются архитектурные и алгоритмические аспекты интеграции методов искусственного интеллекта в киберфизические системы. Анализируются пятиуровневая архитектура 5C, механизмы разработки цифровых двойников и распределенные вычислительные циклы. Систематизированы подходы к применению машинного обучения для прогнозирующего управления, адаптивной оптимизации и диагностики неисправностей. Выявлены критические ограничения, в том числе высокие требования к вычислительным ресурсам нейросетевых моделей, конкурентная уязвимость и отсутствие формальной возможности проверки. Предлагаются методологические решения, включающие квантование моделей, федеративное обучение, гибридные архитектуры с символическим мышлением и объяснимые методы искусственного интеллекта. Показана необходимость разработки стандартизированных процедур сертификации интеллектуальных контуров управления. Сформулированы дальнейшие направления исследований, направленные на разработку киберфизических систем, устойчивых к потоку данных.

**Ключевые слова:** киберфизические системы, искусственный интеллект, машинное обучение, цифровой двойник, верификация

Cyber-physical systems (CPS) are heterogeneous engineering complexes in which computational algorithms, network infrastructure, and physical assets are integrated into a closed-loop control system with continuous real-time data exchange [1, 2]. The development of this paradigm is driven by the transition from deterministic automation systems to adaptive architectures capable of operating under stochastic disturbances and partial observability [3]. The integration of artificial intelligence (AI) methods creates a qualitatively new class of systems in which probabilistic and self-learning models complement traditional controllers, enabling predictive control, dynamic optimization of technological parameters, and autonomous state diagnosis [4]. The architectural basis for industrial implementations is the five-level 5C model (Figure 1), which sequentially implements the functions of smart connection, conversion of raw data, formation of cyber representations, cognitive analysis, and configuration management [1].

This hierarchy ensures the functional separation of computational load and scalability while preserving the determinism of critical control loops. The physical layer, which includes sensor arrays and actuators, is interfaced with network infrastructure based on OPC UA, MQTT, and deterministic Ethernet solutions [13], whereas the application layer accumulates analytical algorithms that close the feedback loop. In modern implementations, computational resources are increasingly decentralized through the introduction of edge-computing

nodes, which reduces data transmission latency and minimizes the risks of compromising sensitive information during primary processing [10].

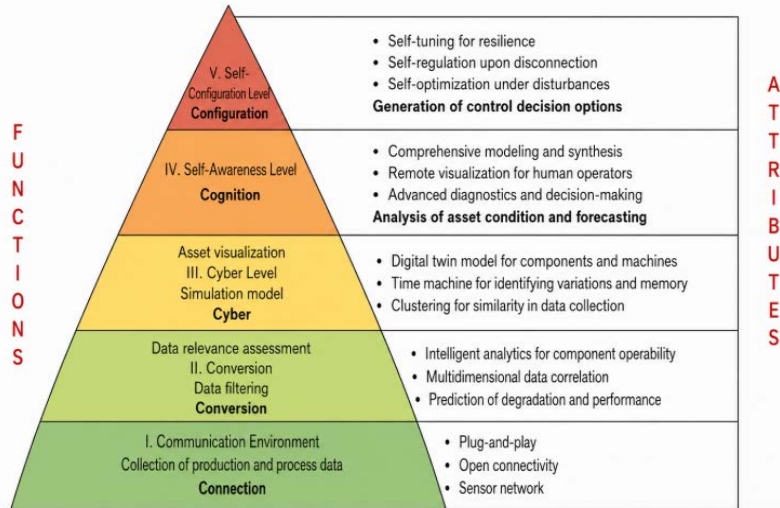


Figure 1 - 5C architecture of a cyber-physical system [1]

Machine learning is applied within the CPS loop mainly to solve tasks related to regression-based prediction of the remaining useful life of equipment, clustering of operating modes, and adaptive control of nonlinear objects [2, 4]. Supervised learning models provide state classification based on historical telemetry data, while unsupervised learning methods reveal hidden patterns of component degradation. Reinforcement learning algorithms demonstrate effectiveness in optimizing multi-criteria objective functions when no analytical model of the controlled object is available [4]. Deep neural networks, including convolutional architectures for visual data processing and recurrent structures for time-series analysis, form the basis of machine-vision and intelligent diagnostic systems. The choice of method is determined by requirements for approximation accuracy, computational complexity, and robustness to noisy input signals (Table 1).

Comparative analysis of artificial intelligence methods for application in cyber-physical systems

Table 1

| AI method                                     | Advantages                                                    | Limitations                                                      | Typical application areas                   |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Decision trees and ensembles                  | Interpretability, low computational complexity                | Tendency to overfitting, limited approximation of nonlinearities | Equipment diagnostics, state classification |
| Support vector machine (SVM)                  | Effectiveness in high-dimensional spaces, robustness to noise | High computational complexity for large datasets                 | Pattern recognition, quality control        |
| Deep neural networks                          | Universality, high approximation accuracy                     | Data requirements, low interpretability                          | Failure prediction, machine vision          |
| Reinforcement learning                        | Adaptability, optimization under uncertainty                  | Long training time, convergence instability                      | Autonomous control, robotics                |
| Hybrid models symbolic + neural-network-based | Explainability, formal verifiability                          | Integration complexity, high design requirements                 | Critical control systems, medicine          |

A research area known as Cyber-Physical AI is emerging within the scientific community. It focuses on the development of algorithms that take into account the physical constraints of computing platforms and the requirements for deterministic response [3]. The practical implementation of these approaches forms the basis of "smart factories," where production lines are capable of autonomous reconfiguration and predictive maintenance. Modeling physical environments for targeted control makes it possible to create knowledge bases for optimizing digital control loops and reducing the probability of failures [6]. At the same

time, the use of robotic devices with AI elements in complex systems gives rise to new verification challenges, the solution of which requires a transition from empirical assessments to formal methods of analysis [5].

The integration of intelligent modules creates a set of scientific and technical challenges, the most important of which is ensuring reliability and safety. The heterogeneous nature of CPS expands the attack surface, while machine learning models are vulnerable to adversarial impacts, attacks on training data, also known as data poisoning, and model inversion techniques [7, 8]. In the context of CPS, the consequences of successful attacks go beyond information security and may lead to the destabilization of physical processes, creating technological risks. A promising direction is the development of active protection methods based on real-time anomaly detection, the use of cryptographic protocols, and the application of distributed ledgers to ensure the immutability of event logs [8].

The second critical limitation is the resource environment of embedded computing platforms, which is characterized by constraints on performance, power consumption, and memory capacity. Traditional deep learning architectures are often incompatible with deterministic-response requirements, which makes it necessary to use model compression, weight quantization, knowledge distillation, and hybrid cloud-edge architectures [10].

The third aspect is the problem of interpretability and verifiability. The high approximation capability of neural networks is accompanied by their "black-box" nature, which complicates the formal verification of correct operation in critical scenarios and reduces trust among operators and regulatory authorities. Addressing this problem requires the development of explainable AI (XAI) methods, hybrid architectures combining symbolic reasoning and neural-network approximation, and the integration of formal verification methods into the development cycle [9]. System reliability in non-stationary environments is further complicated by data drift, sensor degradation, and the emergence of extreme scenarios not represented in training datasets [12]. The systematization of these challenges and possible directions for addressing them is presented in Table 2.

Main scientific and technical challenges and solution directions for AI integration into CPS

Table 2

| Challenge                   | Problem characteristics                                                  | Promising solution directions                                                                     |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cybersecurity               | Vulnerability of models to adversarial attacks, poisoning, and inversion | Real-time anomaly detection, cryptography, blockchain-based auditing [7, 8]                       |
| Resource constraints        | Limitations in computing power, memory, and energy consumption           | Quantization, pruning, edge computing, hardware acceleration using NPU [10]                       |
| Interpretability            | "Black-box" nature of neural-network models, complexity of verification  | XAI methods, hybrid architectures, formal verification [9]                                        |
| Reliability and robustness  | Data drift, sensor noise, extreme scenarios                              | Online learning, ensembles, adaptive filters, digital twins [12, 14]                              |
| Integration and scalability | Heterogeneity of components, growth in data volume                       | Microservice architecture, standardization using OPC UA and IEC 61499 [13], distributed computing |

Further research is focused on overcoming the above limitations and moving toward systems with a high degree of autonomy. Neuromorphic computing architectures can significantly reduce energy consumption and increase the processing speed of event-oriented data, which is particularly important for distributed sensor networks [10]. Quantum computing opens up new possibilities for solving global optimization problems and training high-dimensional models, although its practical integration requires overcoming barriers related to qubit stabilization and the development of hybrid algorithms [11]. Federated learning represents a promising paradigm for distributed training without centralizing raw data, thereby addressing privacy concerns while reducing the load on network infrastructure [12].

Digital twins operating in synchronization with physical objects form the basis for predictive simulation, virtual validation of control algorithms, and

equipment life-cycle optimization [6, 14]. The concept of continuous self-learning and meta-learning is aimed at developing systems capable of adaptation without full retraining. This requires algorithms that are resistant to catastrophic forgetting and support efficient knowledge transfer across domains [12]. The evolutionary trend in CPS development shows a gradual transition from deterministic automated systems to autonomous self-organizing complexes, where hybrid intelligence becomes a key factor in ensuring resilience [3].

The integration of human-in-the-loop and human-on-the-loop paradigms makes it possible to maintain control over critical decisions while minimizing the risks of autonomous errors [4]. The development of a regulatory framework and standardized certification procedures for intelligent control loops remains a necessary condition for the safe deployment of next-generation systems. In summary, the integration of AI into CPS requires consolidated efforts in formal verification, the development of algorithms robust to adversarial impacts, and the creation of standardized frameworks for ensuring reliability. These efforts will determine the trajectory of digital infrastructure development under the conditions of the Fourth Industrial Revolution [1, 3, 5].

The article was prepared with the support of Russian Science Foundation grant №25-21-00445, "Research and development of a mathematical framework for minimizing deviations in the positions of 3D models of reference objects synthesized by simulator systems of aviation training simulators when observed in multi-spectral mode."

#### REFERENCES

1. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. 2015. Vol.3. P.18-23.
2. Beyerer J. *Machine Learning for Cyber-Physical Systems*. Springer Vieweg, 2021. 342 p.
3. Kim T., Lee J., Park S. Cyber-Physical AI: Systematic Research Domain for Integrating AI into Cyber-Physical Systems // *ACM Computing Surveys*. 2025. Vol.57, №.4. doi: 10.1145/3721437.
4. Garg S., Verma D., Gupta S. *Machine Learning for Cyber Physical System: Advances and Applications*. Springer, 2024. 415 p.
5. Годунов А.И., Шишков С.В., Саламон З.А., Мельничук А. И., Алексеев А. В. Искусственный интеллект в вопросах надежности и качества роботизации сложных систем военного назначения // *Надежность и качество сложных систем*. 2025. №3. С.17-25. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-2
6. Коршунов Г.И. Моделирование физических сред для целевого управления в киберфизических системах // *Системный анализ в проектировании и управлении*. 2023. №4. С.45-58.
7. Verma N., Kumar N., Sheikh Z.A., Koul N., Ashish A. Machine Learning for the Cybersecurity of Robotic Cyber-Physical Systems. // *Procedia Computer Science*. 2025. Т. 259. С. 1817-1826.
8. Sedjelmaci H., Guenab F., Senouci S.M., Moustafa H., Liu J., Han Sh. Cyber security based on artificial intelligence for cyber-physical systems // *IEEE Network*. 2020. Т. 34. № 3. С. 6-7.
9. Moosavi S., Farajzadeh-Zanjani M., Razavi-Far R., Palade V., Saif M. Explainable ai in manufacturing and industrial cyber-physical systems: a survey // *Electronics*. 2024. Т. 13. № 17. С. 3497.
10. Gielen G. Neuromorphic computing in the edge: merging cyber and physical // *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*. 2023. P. 1-4.
11. Ellinas P., Chevalier S., Chatzivasileiadis S. A hybrid quantum-classical algorithm for mixed-integer optimization in power systems // *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 235.
12. Ferrari P., Bontempi G., Marini S. Meta-learning to improve unsupervised intrusion detection in cyber-physical systems // *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2021. Vol. 5, №.4. Article 42.
13. IEC 61499-1:2012. Function blocks – Part 1: Architecture. 2nd edition. International Electrotechnical Commission, 2012. 128 p.
14. Коршунов Г.И., Сольников Р.И., Фролова Е. А. Обеспечение качества и создание интеллектуальных систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей // *Надежность и качество сложных систем*. 2022. №2. С.92-101. doi: 10.21685/2307-4205-2022-2-11.
15. Кувшинова О.А., Кувшинова Е.В. Применение нейронной сети для исключения из обработки активных сегментов в режиме реального времени // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2025. № 1 (56). С. 205-211.

УДК 378.14

**Вьюгина<sup>1</sup> С.В.**

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

<sup>1</sup> vsazida@mail.ru

### **СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ РЕЧЕВОЙ КУЛЬТУРЫ СТУДЕНТА**

**Аннотация.** Развитие речевой культуры в образовательном процессе вуза является актуальной проблемой. Новое поколение студентов не хочет воспринимать нормы русского языка и особенности речевой культуры. Изучение дисциплины гуманитарного цикла дает возможность работать над развитием речевой культуры студента технического вуза.

**Ключевые слова:** дисциплины гуманитарного цикла, русский язык, речевая культура, речевое поведение, речевой этикет

**Vyugina<sup>1</sup> S.V.**

<sup>1</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>1</sup> vsazida@mail.ru

### **A MODERN APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF A STUDENT'S SPEECH CULTURE**

**Abstract.** The development of speech culture in the educational process of a university is a relevant issue. The new generation of students does not want to perceive the norms of the Russian language and the features of speech culture. Studying disciplines of the humanitarian cycle provides an opportunity to work on the development of the speech culture of a technical university student.

**Keywords:** disciplines of the humanitarian cycle, Russian language, speech culture, speech behavior, speech etiquette

Изменения в обществе сильно влияют на речевую культуру человека, наблюдается большие перемены не только в публицистике, средствах массовой информации, меняется и язык художественной литературы. Именно средства массовой информации играют большую роль в развитии культуры речи, в то же время СМИ создает современное общественное настроение, формирует массовое сознание, развивает речевую культуру и отношение к самой речи личности.

В образовательной среде вуза студенты рассматриваются как особая возрастная и социальная группа, функционирующая в рамках коммуникативно-профессиональной среды вуза. С одной стороны, оно объединено общими социальными, культурными связями и, являясь частью социума, осуществляет в повседневной жизни непосредственные коммуникативные контакты при помощи одного языка, функционирующего в данном социуме, а с другой – уже начинает приобретать характерные черты профессиональной группы [2025].

В учебном процессе вуза сталкиваемся проблемами низкой речевой культуры, как следствие влияния социума на речевую культуру студентов вуза. Новое поколение студентов не хочет воспринимать требования к культуре речи. Для них образец речевой культуры, это общение по интернету, мы постоянно наблюдаем, что в речи электронных СМИ встречаются многочисленные отклонения от акцентной схемы русского слова, а также русской литературной интонации. В современной речевой практике актуальными стали грамматические и лексико-грамматические изменения. Под влиянием социально-политических факторов изменилось морфологическое значение числа у ряда слов социально-политического обихода, с соответствующим изменением предметного содержания. Такие слова как банк, бюджет, партия, правительство, практически не употребляющиеся ранее во множественном числе со экранов телевизоров ныне перешли к обычному числовому распределению [2].

Особую роль в развитии культуры речи студента в технических вузах большие возможности содержат в себе дисциплины гуманитарного цикла, такие как история Отечества, русский язык, иностранный язык и другие. Данные дисциплины отличаются диалогичностью и при этом студенты учатся выражать в свои впечатления. Полученные знания формируют ценностные ориентиры, ее мотивы, поступки, убеждения и мировоззрение, вкусы и идеалы, взгляды и эмоции. Следовательно, изучение дисциплин гуманитарного цикла способствует обогащению речи, формирует ценностное отношение к языку.

Эффективное развитие культуры речи студентов в процессе изучения дисциплин гуманитарного цикла может быть обеспечено при соблюдении комплекса педагогических условий. Самыми активными при изучении дисциплины «Русский язык и деловые коммуникации» являются два условия:

Во, первых - создание положительной мотивации студентов к развитию культуры речи, реализуется с использованием методов самоанализа, самооценки, взаимоанализа и взаимооценки. Самоанализ и оценка собственной речи способствует развитию умений студента оценивать свою речь с точки зрения ее культуры. Данный метод может стать сильным мотивирующим фактором, с помощью которого возникает

установка на самообразование в области культуры речи, формируются его цели и задачи. В то же время, для того, чтобы понять собственный опыт, необходимо сравниваться в опыт других и соотносить его с собственным;

Во-вторых - вовлечение студентов в процесс дискуссионно-аналитического общения. Как показывает опыт работы дискуссии стимулируют активность и самостоятельной суждений, инициативу, обогащают духовно, позволяют более глубоко вникнуть в морально-этические и политические проблемы, способствуют развитию логики мышления и культуры речи. В процессе дискуссии студент учится точно выражать свои мысли в докладах и выступлениях, активно отстаивать свою точку зрения, аргументированно возражать, опровергать ошибочную позицию сокурсника. В такой работе студент получает возможность показать собственную деятельность, что обуславливает высокий уровень его интеллектуальной и личностной активности, включенности в учебный процесс.

Необходимо отметить, что в учебном процессе четко видно разницу между культурой самого языка и культурой речевого поведения. Культура языка учит пользоваться правильным нормативным языком. Что значит владеть культурой языка? В первую очередь, помнить о функциональных стилях литературного языка. Что такое функциональные стили речи и в каких случаях используется каждый из них? В.В. Виноградов дал такое определение функционального стиля: «Стиль – это общественно осознанная, функционально обусловленная, внутренне объединенная совокупность приемов употребления, отбора и сочетания средств речевой общения в сфере того или иного общественного, общенационального языка, соотносительная с другими такими же способами выражения, которые служат для иных целей, выполняют иные функции в речевой общественной практике данного народа» [2, С.60-87].

Студентам вуза необходимо учитывать, что функциональные стили речи связаны с теми ситуациями, в которых мы оказываемся в жизни, с внеязыковой действительностью. У каждого функционального стиля есть своя экстралингвистическая основа: цели и задачи, которые мы ставим перед собой в ходе общения, тип мышления и особенности содержания. Внутри каждого стиля происходит отбор речевых средств и приемов их употребления для конкретной ситуации.

В современном русском языке принято выделять пять функциональных стилей: разговорный, публицистический, научный, официально-деловой и художественный. Нужно помнить, что расслабленная манера общения с друзьями не годится для научной статьи, а яркие эпитеты и метафоры не подойдут при работе с документами. Все стили, кроме разговорного, считаются книжными, первично письменными и вторично устными.

В то же время нужно понимать, что границы между разными стилями во многом условны, каждый из них не образует замкнутую систему. Например, черты разговорного стиля могут присутствовать в художественном, особенно если это диалоги героев произведения; и в научном стиле, при обсуждении каких-то научных проблем. Основу большинства текстов составляет нейтральная, т.е. общеупотребительная, межстилевая лексика, которая подходит для любого стиля речи.

На занятиях идет формирование и развитие речевой культуры студента. Как нам известно, в основе культуры речевого поведения лежат вежливость и благожелательность и должно быть соответствие общечеловеческим нормам вежливости, доброты, этикета. Во все времена правильная речь считалась залогом успеха и по этой причине выпускники вузов наряду с хорошими профессиональными знаниями должны обладать способностью доказать свою точку зрения, свою позицию, говорить грамотно, убедительно и красиво. На занятиях в первую очередь обращаем внимание на чистоту речи, в лексике молодых людей огромное количество лишних слов, слов-сорняков, слов-паразитов. Конечно, в языке названных слов нет, такими они становятся в речи говорящего из-за частого, неуместного их употребления, т.к. они активно вставляют в свою речь «любимые словечки»: так сказать, значит, вот, собственно говоря, видите ли, короче, блин и др. Это производит очень неприятное впечатление. Слова-сорняки, слова-паразиты не несут никакой смысловой нагрузки, не обладают информативностью [5].

В учебном процессе забота о чистоте речи повышает качество речевой деятельности. Нет сомнения, что структура речи, ее свойства и особенности могут будить мысли и чувства людей, могут поддерживать обостренное внимание и вызывать интерес к сказанному. Эти особенности речевой структуры позволяют называть ее выразительной, именно выразительностью речи называются такие особенности ее структуры, которые поддерживают внимание и интерес у слушателя или читателя; соответственно речь, обладающая этими особенностями, и будет называться выразительной [4].

При выполнении служебных обязанностей выразительность речи любого специалиста, не будет совпадать с выразительностью речи политического оратора, это в

первую очередь, связано с ситуацией общения. Для выработки выразительной речи молодых специалистов можно выделить несколько условий, от которых зависит и культура речи. Необходимо помнить, что речевая культура напрямую связана речевым этикетом. Что означает речевой этикет – это некие принятые в конкретной среде формы, обеспечивающие включение в речевой контакт и поддержание общения. Кроме того, это правила речевого поведения, состоящие из речевых запретов и разрешений, а также стилистические ресурсы языка. Речевой этикет является важным элементом любой национальной культуры, и при этом может иметь как нечто схожее с другой культурой, так и различное, и специфическое.

Научная литература предлагает рассматривать понятие речевого этикета через коммуникацию и в контексте культуры. Так, природа общения в аспекте коммуникативной лингвистики анализируется в монографии Формановской Н.И. [7]. Автор вводит понятие коммуникативной ситуации говорящего и адресата в их социальных и психологических отношениях. Эта тема находит свое продолжение в исследованиях русского речевого этикета, где подробно описываются правила поведения в важнейших этикетных ситуациях: при встрече, знакомстве, прощании и др. [7].

Речевой этикет обладает набором общих для различных культур черт. К ним относятся вежливость, тактичность, позитивное отношение к собеседнику, использование речевых формул. В специальной литературе насчитывается более 10 различных ситуаций речевого этикета, при работе с иностранными студентами акцент делается общности этих ситуаций. Для правильного употребления ту или иную этикетную форму иностранным студентом, необходимо ознакомить с формулами речевого этикета, которые могут быть различные в зависимости от ситуации. После установления отличий предлагается система упражнений: диалоги с подстановкой, проблемно-поисковые типы заданий, разыгрывание ситуаций, моделирующих какой-то момент общения, составление диалогов, документов, ролевые игры, визуальные и мультимедийные материалы. Благодаря использованию целого комплекса заданий у студентов вырабатываются наиболее эффективные стратегии поведения в этикетной ситуации [4].

Культура речи включает владение специальными навыками и умениями профессиональной деятельности, культуру поведения, общую культуру речи. Специальные навыки приобретаются в процессе профессиональной подготовки, т.е. культура речевого поведения формируется личностью в соответствии с образовательным процессом вуза. Этический аспект культуры речи предусматривает знание и применение правил языкового поведения в различных ситуациях общения, при этом существует запрет на сквернословие в процессе общения, осуждается разговор на «повышенных тонах» с использованием оскорбительных, обидных слов в адрес собеседника.

Для развития речевого культуры студентов вуза необходимо прививать и развивать любовь к русскому языку, т.к. высокий уровень речевой культуры – неотъемлемая черта культурного человека. Совершенствовать свою речь – задача каждого молодого человека. Для этого нужно следить за своей речью, чтобы не допускать ошибок в произношении, в употреблении форм слов, в построении предложений. Нужно постоянно обогащать свой словарный запас, учиться чувствовать собеседника, уметь отбирать наиболее подходящее для каждого случая слова и словосочетания. Мудрая пословица гласит «Встречают по одежке, а провожают по уму», показатель ума – это наша правильная речь. Правила пользования русским языком предполагает наличие собственного внутреннего чувства стиля, хорошим эстетическим вкусом. Наличие этих показателей являются предпосылкой развития речевого поведения в образовательной среде вуза [6].

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Введенская, Л.А. Русский язык и культура речи / Л.А. Введенская, Л.Г. Павлова, Е.Ю. Кашаева. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. – 384 с.
2. Виноградов, В.В. Итоги обсуждения вопросов стилистики /В.В.Виноградов //Вопросы языкознания, 1955, №1. – С.60-87.
3. Вьюгина, С.В. Культура речи будущего инженера / С.В. Вьюгина // Международная сетевая научно-практическая конференция: «Региональное развитие: новые вызовы для инженерного образования». – Синергия - 2021» - Казань: КНИТУ, 2021. – С.34-42.
4. Вьюгина, С.В. Методика преподавания русского языка как иностранного в образовательной среде вуза / С.В. Вьюгина, И.И.Галимзянова // Международный симпозиум «Надежность и качество» 22-31 мая 2023 г. – Пенза: ПГУ, 2021 – С.210-212.
5. Вьюгина, С.В. Обучение иностранных студентов русскому языку в современной образовательной среде вуза /С.В. Вьюгина, И.И. Галимзянова // Международный симпозиум «Надежность и качество», посвященный к 300-летию Российской академии наук. – Пенза: ПГУ, 2024. Т.1. - С.298-299.
6. Вьюгина, С.В. Развитие речевой культуры студента вуза /С.В. Вьюгина //Международный симпозиум «Надежность и качество». –Пенза: ПГУ, 2025, Т.1. – С.296-298.
7. Формановская, Н.Н. Речевой этикет и культура общения. – М.: Высшая школа, 1989, - 159 с.

**Бушмелева<sup>1</sup> К.И., Яременко<sup>2</sup> Д.А.**

<sup>1,2</sup> Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>1</sup> bushmeleva\_ki@surgu.ru

<sup>2</sup> yaremenko\_da@surgu.ru

### **ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ЗДАНИЯХ**

**Аннотация.** Рассматриваются проблемы моделирования эвакуационных потоков в зданиях, и проводится критический анализ трёх наиболее популярных программных продуктов - Pathfinder, MassMotion и Legion. Выявлены основные ограничения существующих моделей, включая недостаточный учёт предэвакуационного поведения, объёма и ориентации людей, а также социальных связей между ними. Показано, что игнорирование этих факторов приводит к занижению времени эвакуации и ошибочной оценке плотности людских потоков. Предложены направления совершенствования методик моделирования, включающие интеграцию поведенческих и физических параметров, расширение базы эмпирических данных и внедрение процедур валидации. Результаты исследования могут быть использованы для повышения точности расчётов и улучшения проектных решений в области противопожарной безопасности зданий.

**Ключевые слова:** эвакуация, моделирование потоков, Pathfinder, MassMotion, Legion, предэвакуационное поведение, социальные связи, валидация моделей

**Bushmeleva<sup>1</sup> K.I., Yaremenko<sup>2</sup> D.A.**

<sup>1,2</sup> Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>1</sup> bushmeleva\_ki@surgu.ru

<sup>2</sup> yaremenko\_da@surgu.ru

### **PROBLEMS OF EVACUATION FLOW MODELING IN BUILDINGS**

**Abstract.** The article examines the problems of modeling evacuation flows in buildings and provides a critical analysis of three of the most popular software products - Pathfinder, MassMotion, and Legion. The main limitations of existing models are identified, including the insufficient consideration of pre-evacuation behavior, body volume and orientation, as well as social connections between people. It is shown that neglecting these factors leads to an underestimation of evacuation time and errors in assessing flow density. The paper proposes directions for improving modeling methods, including the integration of behavioral and physical parameters, the expansion of empirical data, and the implementation of validation procedures. The results of the study can be used to increase the accuracy of calculations and improve design decisions in the field of fire safety of buildings.

**Keywords:** evacuation, flow modeling, Pathfinder, MassMotion, Legion, pre-evacuation behavior, social connections, model validation

**Введение.** Актуальность темы продиктована ростом плотности людей в общественных и коммерческих зданиях и необходимостью обоснования решений по обеспечению их пожарной и эвакуационной безопасности, что закреплено в действующих нормативных документах РФ. Моделирование эвакуационных потоков давно рассматривается как один из основных инструментов проектирования и оценки безопасности: научные обзоры и отчёты подчеркивают разнообразие подходов (оптимизационные, агент-ориентированные, потоковые) и широкое применение компьютерных симуляций в практике инжиниринга безопасности. Среди исследовательских моделей заметное место занимает модель "social-force" и её модификации, позволяющие воспроизводить такие явления, как образование плотности у выходов и эффект "быстрее - медленнее", а в промышленном ПО используются как агент-ориентированные симуляторы, так и пакеты для нормативных расчётов (например, Pathfinder) [1; 6]. В то же время обзоры и практические исследования указывают на существенные упрощения в большинстве существующих реализаций - от неглубокого учёта объёма и размеров тел в потоке до ограниченной модели социального взаимодействия и поведенческих реакций, что может искажать оценки времени эвакуации и характеристик узких мест. В настоящей статье ставится задача критически проанализировать популярные отечественные и зарубежные программные продукты для моделирования эвакуации людей, выявить их ключевые ограничения и предложить направления повышения реалистичности моделей с учётом физических и поведенческих факторов.

**Обзор существующих подходов.** В отечественной практике проектирования и оценки пожарной и эвакуационной безопасности акцент делается на соблюдении сводов правил и нормативов, задающих минимальные требования к эвакуационным путям, числу и расположению выходов, ширине лестниц и прочим элементам эвакуационной инфраструктуры. Эти документы формируют рамки, в которых выполняются как инженерные расчёты, так и компьютерные симуляции, и служат отправной точкой для оценки адекватности моделирования.

Научная литература последних лет фиксирует широкий набор подходов к моделированию эвакуационных процессов: от макроскопических потоковых моделей до детализированных агент-ориентированных симуляций и гибридных мультиметодных решений [3]. Обзорные исследования подчёркивают рост интереса к агент-



ориентированным моделям (АОМ) и их преимуществам при описании индивидуального принятия решений, но одновременно указывают на ограничения по валидации и масштабированию таких моделей при решении практических задач [10].

Среди используемых методик выделяются модели типа "social-force", агент-ориентированное моделирование и поточные модели для быстрой оценки характеристик эвакуации. В рамках данной работы рассматриваются три популярных инструмента: Pathfinder, MassMotion и LEGION. Первый удобен для сценарного анализа и адаптивен к изменениям условий эвакуации, второй подходит для точного воспроизведения потоков в сложных объектах, третий используется для анализа больших пассажиропотоков.

Несмотря на преимущества представленных программ, выявлены ключевые ограничения: упрощённое представление физического размера людей и предметов, недостаточный учёт социальных взаимодействий и индивидуальных различий в поведении. Проведенный анализ источников подтверждает необходимость тщательной адаптации и интерпретации полученных результатов, учитывая специфику конкретного проекта и возможные ограничения моделей.

**Методология исследования.** Работа выполнена методом систематического обзора нормативных документов и литературы, функционального анализа трех популярных программных комплексов для моделирования эвакуации (Pathfinder, MassMotion, LEGION) и экспериментального тестирования типичных сценариев. Использованы российские нормы проектирования эвакуационных путей, изучены архитектуры и возможности каждой программы. Проведены серии симуляций стандартных ситуаций (концертный зал, офис, транспортный узел) с оценкой ключевых метрик (время эвакуации, плотности, задержки) и применением методов проверки устойчивости результатов. Особое внимание уделено верификации и валидации моделей, оценке влияния поведенческих факторов (преддвижение, групповая динамика, габариты агентов). Ограничениями метода являются частичный доступ к эмпирическим данным и зависимость результатов от версии программного обеспечения. Выводы включают рекомендации по повышению точности и реалистичности эвакуационного моделирования.

**Оценка функциональности и применяемых моделей выбранных приложений.** Оценка функциональности производилась с общего замечания: все три выбранных продукта - Pathfinder, MassMotion и LEGION - позиционируются как профессиональные инструменты для моделирования пешеходных и эвакуационных потоков, снабжённые удобными средствами построения геометрии, визуализации результатов и набором типовых поведенческих правил. При этом каждое решение в силу исторического развития и целевой аудитории делает упор на разные аспекты моделирования: пригодность к инженерным расчётам, гибкость настройки поведения агентов или работа в масштабах инфраструктурных объектов.

Pathfinder удобен для сценарных и визуальных экспериментов с агент-ориентированными правилами; MassMotion - более инженерно-ориентирован в части калибровки и восстановления микродинамики потока через social-force подход; LEGION силён в задачах инфраструктурного планирования и аналитики больших потоков. Все три решения обладают мощным функционалом, но имеют типовые ограничения в адекватном учёте объёма тел, глубокой социально-психологической адаптивности и верификации при экстремальных плотностях - те аспекты, которые требуют дополнительной методической работы и полевой валидации.

**Основные недостатки и упрощения в существующих моделях эвакуации.** Современные модели эвакуации основаны на ряде упрощений, снижающих реалистичность описания поведения людей и их взаимодействия с окружающим пространством. Во-первых, люди чаще всего представляются как точки или небольшие объекты, что искажает восприятие занимаемого ими пространства, особенно при высоких плотностях и движении через узкие проходы. Во-вторых, недостаточно учтено влияние социальной структуры и группового поведения, которое значительно меняет динамику людского потока. Предэвакуационные стадии тоже слабо отражают реальность: людям требуется время на осознание опасности и принятие решений, что увеличивает общее время эвакуации. Механизмы столкновения и динамики движения упрощены и плохо передают эффекты плотной толпы. Модели зачастую плохо переносят параметры между разными объектами и ситуациями, что вызывает трудности при повторной калибровке. Наконец, недостаток интеграции психологических аспектов, культурных особенностей и контекста обстановки снижает предсказательную силу симуляторов. Все эти недостатки ведут к существенным отклонениям расчётных времён эвакуации и пропускных способностей от реальности, что подчеркивает важность дальнейшего развития моделей и включения большего числа переменных.

**Влияние неучтённых факторов на характеристики эвакуации.** Недооценка предэвакуационного поведения (pre-movement) напрямую влияет на расчётные времена эвакуации: если симулятор не учитывает реальных задержек на распознавание

опасности, сбор информации и сбор домашних вещей, итоговое суммарное время может оказаться значительно заниженным.

Исследования фундаментальной диаграммы "плотность-скорость-поток" подчёркивают, что взаимосвязь этих параметров зависит от множества факторов (структуры пространства, мотивации, состава толпы), и нет единой универсальной кривой - потому проигнорированные габариты и ориентация тел изменяют локальные значения скорости и потока.

На рисунке 1 приведена фундаментальная диаграмма плотности и скорости для пешеходного потока. По оси абсцисс откладывается плотность людей, по оси ординат - средняя скорость движения. Видно, что при росте плотности скорость стремится к нулю, а игнорирование факторов, влияющих на плотность и движение, может привести к значительным ошибкам в оценке времени эвакуации и образования узких мест.

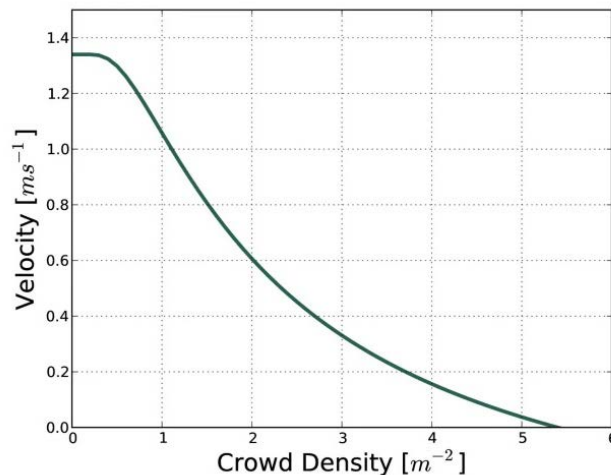


Рисунок 1 - Зависимость средней скорости пешеходов от плотности людей

В узких местах и при стресс-сценариях эффект "архивирования" и "заторности" (clogging), а также феномен "быстрее - значит медленнее", когда попытки увеличить скорость движения приводят к снижению пропускной способности, доказаны в моделях и экспериментах и тесно связаны с физикой межличностных взаимодействий. Модели, не репрезентирующие эти нелинейные эффекты или использующие слишком простые схемы столкновений, не смогут предсказать локальные скачки давления, очереди и моменты возникновения давящих нагрузок, которые критичны для оценки безопасности.

Упрощённое представление социальных связей и групповой динамики изменяет структуру потоков и время эвакуации. Группы, семейные пары и иерархические связи в толпе формируют "кластеры" движения: они замедляют локальное продвижение, изменяют распределение плотности по площади и влияют на выбор маршрутов (например, ожидание друг друга при разделении). Если модель опирается только на статические шаблоны "группового следования", а не на динамическую модель формирования и распада социальных связей, она не воспроизводит реальные сценарии взаимного подстраивания и компромиссов между скоростью и сохранением группы.

Симуляции демонстрируют, что игнорирование связи между людьми (семья, друзья) упрощает модель. На рисунке 2 видно сравнение сценариев: (a) - все индивиды действуют независимо, (b) - они эвакуируются парами. В парном случае образуется более крупный и заторможенный конвой - зона затора (оранжевый цвет) смещена вперёд и время эвакуации заметно выше. Подобное моделирование показало, что социальные группы "растягивают" фронт толпы и замедляют общий поток по сравнению с нулевым уровнем группирования.

Различия по демографическим и культурным признакам, а также наличие людей с ограниченной подвижностью оказывают численные эффекты на среднюю скорость и пиковые плотности. Наконец, слабая верификация моделей и ограниченность эмпирических наборов данных усугубляют неопределённость выводов: даже при корректно заданных входных параметрах разные пакеты могут давать разные прогнозы по времени эвакуации и плотностям, если алгоритмы взаимодействия и калибровочные базы различаются.

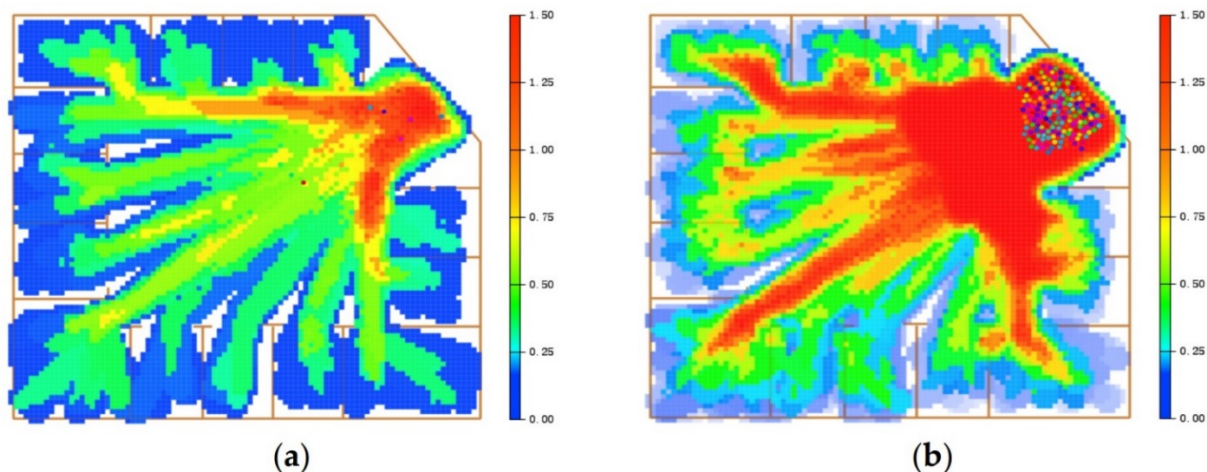


Рисунок 2 - Моделирование эвакуации без учёта (а) и с учётом группового поведения (б). Оранжевая зона - область высокой плотности (затор)

В совокупности неучтённые или упрощённые факторы приводят к трём практическим последствиям: а) заниженная оценка общего времени эвакуации из-за неучёта преддвижений и замедляющих групповых эффектов; б) неверная локализация и масштаб проблем на узких местах - либо недообнаружение "горячих точек", либо ложное выделение проблем там, где их нет; с) снижение достоверности оценок риска и рекомендованных мероприятий (ширина выходов, число эвакуационных маршрутов, оперативные процедуры). Эти выводы диктуют осторожность при использовании готовых симуляторов и служат основанием для расширения моделей и практики их валидации.

**Обсуждение результатов анализа.** Результаты проведённого анализа подтверждают, что моделирование эвакуационных потоков в настоящее время развито технически - существуют формализованные нормативные рамки и проверенные инструменты, но на практике отображение реального поведения людей в моделях остаётся неполным. Российские нормативы задают чёткие требования к эвакуационным путям и выходам, что задаёт рамки для инженерных расчётов, однако сами по себе нормы не решают вопросы адекватности микродинамики потоков в симуляторах.

Коммерческие пакеты показывают высокую инженерную зрелость: у многих из них имеются процедуры проверки и валидации, доступные отчёты и кейсы применения. Так, у MassMotion опубликованы подробные V&V-отчёты и примеры калибровки под эмпирические наблюдения, что повышает доверие к получаемым результатам при условии корректной настройки. Аналогично, у Pathfinder доступны материалы по верификации движений симуляции и режимам работы, что делает возможным осознанный выбор параметров моделирования. Тем не менее наличие V&V не исключает необходимости проектной калибровки и критической интерпретации выводов.

Ключевым практическим выводом является значимость предэвакуационного этапа (*pre-movement*): эмпирические исследования демонстрируют высокую вариабельность времени реакции людей после получения сигнала и до начала движения, и именно это часто определяет большую часть суммарного времени эвакуации в реальных событиях. Модели, которые не учитывают такую вариативность или используют усреднённые задержки без контекстной адаптации, рискуют существенно занижать реальные сроки эвакуации.

В целом обсуждение показывает: симуляторы дают ценные инсайты и позволяют тестировать альтернативные проектные решения, но их результаты нужно рассматривать как часть комплексной инженерной оценки - вместе с нормативными требованиями, эмпирическими наблюдениями и здравым смыслом при принятии решений о планировке и оперативных процедурах.

**Заключение и рекомендации.** Подводя итог можно отметить, что современные программные средства моделирования эвакуационных потоков предоставляют инженерам и исследователям мощный набор инструментов для визуализации ситуаций и проведения сценарных расчётов, однако их результаты нельзя считать бесспорной "правдой" без учёта исходных допущений и калибровки под конкретный объект и популяцию. Нормативная база задаёт формальные требования к эвакуационным путям и выходам, но не снимает с моделирования задачи адекватного воспроизведения человеческого поведения в условиях реальной эвакуации.

Основная причина ограничений - структурные упрощения моделей: отсутствие детальной репрезентации предэвакуационного этапа (решений, задержек, обмена информацией), неполный учёт объёма и ориентации тел при высоких плотностях, а

также шаблонные представления социальных связей и адаптивного поведения. Научная литература и отчёты по валидации подчёркивают, что эти факторы формируют значимую долю расхождений между симуляциями и полевыми наблюдениями, поэтому без их учёта прогнозы времени эвакуации и распределения плотностей могут оказаться систематически смещёнными.

Практические рекомендации для пользователей и разработчиков ПО:

Всегда документировать и обосновывать входные допущения.

Проводить проектную калибровку и чувствительный анализ.

Учитывать предэвакуационное поведение в сценариях.

Улучшать представление физики межличностного взаимодействия при больших плотностях.

Развивать и применять стандартизованные процедуры верификации и валидации.

Интеграция социально-психологических факторов и сбор эмпирических данных. Для повышения реалистичности моделей важно развивать механизмы динамического формирования групп, обмена информацией и адаптивного выбора маршрутов.

Организовывать междисциплинарное взаимодействие.

Существующие симуляторы остаются ценным инструментом при проектировании и анализе безопасности зданий, но их выводы нужно рассматривать как ориентиры, а не как окончательные ответы. Улучшение их практической полезности лежит через смещение более богатой модели поведения, аккуратную физическую модель взаимодействий при больших плотностях и системную валидацию на полевых данных. Реализация этих рекомендаций повысит качество инженерных решений и уменьшит риск ошибочных интерпретаций при оценке эвакуационной безопасности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Helbing D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics [Модель социальных сил для динамики пешеходов] // *Physical Review E*. - 1995. - Т. 51, № 5. - С. 4282-4286. - DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282. - Режим доступа: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.51.4282> (дата обращения: 12.10.2025).
2. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [Моделирование динамических особенностей паники при побеге] // *Nature*. - 2000. - Т. 407. - С. 487-490. - DOI: 10.1038/35035023. - Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/35035023> (дата обращения: 12.10.2025).
3. Kuligowski E.D., Peacock R.D., Hoskins B.L. A Review of Building Evacuation Models [Обзор моделей эвакуации из зданий]: технический отчет NIST TN 1680 / National Institute of Standards and Technology (NIST). - Gaithersburg, MD, 2010. - 36 с. - Режим доступа: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=906951](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=906951) (дата обращения: 12.10.2025).
4. Гвинн С., Галеа Э. Р., Оуэн М., Лоуренс П. Дж., Филиппидис Л. Обзор методологий, используемых в компьютерном моделировании эвакуации из искусственной среды [A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment] // *Building and Environment*. - 1999. - Т. 34. - С. 741-749. - Режим доступа: <https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/178/> (дата обращения: 12.10.2025).
5. Оуэн М., Галеа Э. Р., Лоуренс П. Дж. Применение модели эвакуации EXODUS к сценариям эвакуации из зданий [The EXODUS evacuation model applied to building evacuation scenarios] // *Journal of Fire Protection Engineering*. - 1996. - Т. 8, № 2. - С. 65-86. - Режим доступа: [https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SFPE/93e7d31c-6432-4991-b440-97a413556197/UploadedImages/JFPE\\_1996\\_2\\_2.pdf](https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SFPE/93e7d31c-6432-4991-b440-97a413556197/UploadedImages/JFPE_1996_2_2.pdf) (дата обращения: 12.10.2025).
6. Thunderhead Engineering. Руководство пользователя Pathfinder [Pathfinder Technical Reference Manual]. - Manhattan, KS: Thunderhead Engineering, 2023. - 233 с. - Режим доступа: <https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-technical-reference-manual-2023-1.pdf> (дата обращения: 12.10.2025).
7. Проверка и валидация MassMotion для моделирования эвакуации [The Verification and Validation of MassMotion for Evacuation Modelling]: отчет / Arup MassMotion. - London: Arup / Oasys, 2015. - 132 с. - Режим доступа: <https://www.oasys-software.com/wp-content/uploads/2017/11/The-Verification-and-Validation-of-MassMotion-for-Evacuation-Modelling-Report.pdf> (дата обращения: 12.10.2025).
8. Bentley Systems. Руководство по моделированию в LEGION Simulator [LEGION Model Builder Guide]. - 2019. - 390 с. - Режим доступа: <https://www.inas.ro/files/docs/bentley/bentley-legion-simulator.pdf> (дата обращения: 12.10.2025).
9. Кулиговски Э. Д. Моделирование здания: исследование предэвакуационного периода катастрофы ВТЦ 2001 года [Model Building: An Examination of the Pre-evacuation Period of the 2001 WTC Disaster] // *Fire and Materials*. - 2015. - Т. 39. - С. 285-300. - Режим доступа: <https://www.publish.csiro.au/wf/wf20038> (дата обращения: 12.10.2025).
10. Сенанаяке Г. П. Д. П. и др. Обзор агентного моделирования для эвакуации пешеходов: состояние дел [Agent-based simulation for pedestrian evacuation: state of the art review] // *Computers & Industrial Engineering*. - 2024. - Т. 192. - Ст. 110217. - DOI: 10.1016/j.cie.2024.110217. - Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420924004679> (дата обращения: 12.10.2025).
11. Кинатеде М. Т., Кулиговски Э. Д., Ренеки П. А., Пикок Р. Д. Восприятие риска в поведении при пожарной эвакуации пересмотрено: определения, смежные понятия и эмпирические доказательства [Risk perception in fire evacuation behavior revisited: definitions, related concepts, and empirical evidence] // *Fire Science Reviews*. - 2015. - Т. 4, № 1. - Ст. 1. - DOI: 10.1186/s40038-014-0005-z. - Режим доступа: <https://firesciencereviews.springeropen.com/articles/10.1186/s40038-014-0005-z> (дата обращения: 12.10.2025).
12. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы: свод правил / МЧС России. - Введ. 2020-12-23. - М., 2020. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/565248961> (дата обращения: 12.10.2025).

УДК 629.05

**Баннов<sup>1</sup> В.Я., Грузд<sup>2</sup> И.И.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> bvy@bk.ru

<sup>2</sup> ilya\_gruzd02@mail.ru

### **ПРОБЛЕМЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ**

**Аннотация.** Рассматриваются актуальные проблемы кибербезопасности в автомобильной промышленности. Анализируются потенциальные угрозы и их последствия, а также предлагаются меры защиты, которые могут быть предприняты автопроизводителями, поставщиками и автовладельцами.

**Ключевые слова:** кибербезопасность, автомобиль, кибератака, защита, блокчейн, искусственный интеллект, стандартизация, осведомленность, сотрудничество

**Bannov<sup>1</sup> V.Ya., Gruzd<sup>2</sup> I.I.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> bvy@bk.ru

<sup>2</sup> ilya\_gruzd02@mail.ru

### **PROBLEMS CYBERSECURITY OF CARS**

**Abstract.** This paper examines the current problems of cybersecurity in the automotive industry, analyzes potential threats and their consequences, and suggests protective measures that can be taken by automakers, suppliers and car owners.

**Keywords:** cybersecurity, car, cyber-attacks, protection, blockchain, artificial intelligence, standardization, awareness, cooperation

#### **Введение**

Современные автомобили уже давно перестали быть просто средством передвижения. С каждым годом они всё больше оснащаются электронными системами и программным обеспечением, превращаясь в сложные компьютерные системы на колесах. Эта растущая зависимость от электроники, с одной стороны, делает автомобили более комфортными, функциональными и безопасными. С другой стороны, автомобили становятся более уязвимыми для хакерских атак.

Таким образом, кибербезопасность в автомобильной промышленности становится все более актуальной проблемой, требующей комплексного подхода к ее решению.

Угрозы кибербезопасности в автомобильной промышленности

Современные автомобили, оснащенные множеством электронных систем и подключенные к интернету, подвержены различным типам киберугроз.

Злоумышленники могут использовать уязвимости в программном обеспечении бортовых систем, таких как операционная система, системы управления двигателем, системы помощи водителю, информационно-развлекательные системы, для получения доступа к ним и контроля над ними.

Злоумышленники также могут манипулировать системами управления автомобилем, такими как тормоза, рулевое управление, система автоматического экстренного торможения, для создания опасных ситуаций на дороге или даже для угона автомобиля.

Хакеры могут перехватывать данные, передаваемые между автомобилем и другими устройствами, например, смартфоном, серверами автопроизводителя или другими транспортными средствами. Это может быть информация о местоположении, маршрутах движения, скорости, техническом состоянии автомобиля, а также персональные данные водителя и пассажиров.

Для этого могут быть использованы различные методы. Бортовые системы автомобиля могут заражаться вредоносным ПО, которое позволяет получить доступ к системам автомобиля, украсть данные или манипулировать его функциями. Хакеры могут использовать специальные устройства для перехвата радиосигналов между автомобилем и другими устройствами, например, ключом зажигания, брелоком сигнализации или другими транспортными средствами. Также могут использоваться уязвимости в сетевых подключениях автомобиля для получения удаленного доступа к его системам и управления им.

Помимо этих методов, киберпреступники также могут использовать методы социальной инженерии, такие как фишинг и сбрутфорс, для получения доступа к конфиденциальной информации или взлома бортовых систем.

Последствия кибератак на автомобили

Кибератаки на автомобили могут иметь серьезные последствия для людей, имущества и инфраструктуры:

взлом систем управления автомобилем, таких как тормоза или рулевое управление, может привести к авариям с серьезными последствиями для водителей, пассажиров и других участников дорожного движения;

кража персональных данных, хранящихся в бортовых системах автомобиля, может привести к мошенничеству, краже средств с банковских счетов или другим финансовым потерям;

кибератаки на автомобили могут привести к сбоям в работе транспортных систем, что может негативно сказаться на экономике в целом;

киберпреступники могут использовать свой доступ к бортовым системам автомобиля для его угона или использования в своих преступных целях.

В последние годы уже были зафиксированы случаи кибератак на автомобили. За период с 2010 по 2020 годы было зарегистрировано 633 кибератаки.

В 2015 году хакеры взломали систему Fiat Chrysler Uconnect, что позволило им дистанционно управлять некоторыми функциями автомобиля, такими как кондиционер и радио. После этого, при помощи вредоносного ПО, была взломана система Tesla Model S, что позволило злоумышленникам открыть двери автомобиля и запустить двигатель.

В 2017 году была взломана система Uber, что позволило хакерам получить доступ к данным о местоположении водителей и пассажиров.

В 2021 году была обнаружена уязвимость в мобильном приложении Hyundai, которая позволила автоугонщикам легко завладеть машинами.

В России в 2022 году в даркнете начали предлагать услуги по удаленному взлому автомобилей.

В 2023 году в США появился новый метод угона автомобилей с помощью телефонов Nokia. Этот метод угона позволяет ворам даже без технического опыта угонять автомобили без ключа за 10-15 секунд.

Кибербезопасность в автомобильной промышленности поднимает ряд этических проблем. Автопроизводители и поставщики автомобильных компонентов должны защищать персональные данные водителей и пассажиров от несанкционированного доступа.

Кто должен нести ответственность за ущерб, причиненный кибератаками на автомобили? Автопроизводители, поставщики автомобильных компонентов, автовладельцы или государства?

Как сбалансировать стремление к защите автомобилей от кибератак с сохранением свободы и безопасности людей?

Решение этих этических проблем потребует совместных усилий автопроизводителей, поставщиков автомобильных компонентов, правительств и общества в целом.

Меры по обеспечению кибербезопасности в автомобильной промышленности

Автопроизводители и поставщики автомобильных компонентов должны предпринять ряд мер для защиты своих продуктов от кибератак:

при разработке программного обеспечения и бортовых систем необходимо использовать методы обеспечения безопасности, такие как анализ кода, тестирование на проникновение и шифрование данных;

автопроизводители и поставщики должны регулярно выпускать обновления программного обеспечения для своих продуктов, чтобы устранять выявленные уязвимости;

все данные, передаваемые между автомобилем и другими устройствами, должны быть зашифрованы, чтобы защитить их от перехвата и несанкционированного доступа. для доступа к бортовым системам автомобиля должны использоваться надежные методы аутентификации и авторизации, такие как многофакторная аутентификация;

сотрудники автопроизводителей и поставщиков должны проходить обучение по вопросам кибербезопасности, чтобы они знали, как распознавать и реагировать на кибератаки.

Автовладельцы также могут предпринять ряд мер для защиты своих автомобилей от кибератак, такие как регулярная установка обновления программного обеспечения для бортовых систем автомобиля; использование надежных паролей и методов многофакторной аутентификации для доступа к бортовым системам автомобиля; избегание подключения к ненадежным сетям wi-fi; а также, установка антивирусного программного обеспечения на смартфон или другое устройство, которое используется для подключения к автомобилю.

Помимо этого, необходимо быть внимательным к любым подозрительным сообщениям или действиям, связанным с автомобилем, и немедленно сообщать о них автопроизводителю или поставщику автомобильных компонентов. Автовладельцам также следует следить за новостями о киберугрозах в автомобильной промышленности и быть готовыми к реагированию на кибератаки.

Будущее кибербезопасности в автомобильной промышленности

В связи с ростом киберугроз в автомобильной промышленности разрабатываются новые технологии и подходы для обеспечения кибербезопасности автомобилей:

технология блокчейн может быть использована для защиты данных, хранящихся в бортовых системах автомобиля, от несанкционированного доступа и изменения.

искусственный интеллект может быть использован для обнаружения и предотвращения кибератак на автомобили. Системы, основанные на ИИ, могут анализировать большие объемы данных в режиме реального времени для выявления подозрительной активности и предотвращения кибератак до того, как они нанесут ущерб.

архитектура с нулевым доверием предполагает, что ни одному устройству или пользователю не предоставляется доступ к ресурсам системы по умолчанию. Доступ предоставляется только после проверки подлинности и авторизации.

Несмотря на наличие перспективных технологий, для обеспечения долгосрочной кибербезопасности автомобилей необходимо решить ряд проблем. В настоящее время не существует единых стандартов кибербезопасности для автомобильной промышленности. Это затрудняет разработку и внедрение эффективных мер защиты.

Необходимо повысить осведомленность о киберугрозах в автомобильной промышленности среди автопроизводителей, поставщиков и автовладельцев.

Для разработки и реализации эффективных решений в области кибербезопасности необходимо тесное сотрудничество между правительствами, отраслью и академическими кругами.

Решение этих проблем потребует значительных усилий и инвестиций, но оно необходимо для обеспечения безопасности автомобилей в будущем.

#### **Заключение**

Кибербезопасность в автомобильной промышленности - это не просто вопрос удобства, это вопрос безопасности. По мере того, как автомобили становятся все более зависимыми от электроники и программного обеспечения, они также становятся более уязвимыми для кибератак.

Последствия кибератак на автомобили могут быть серьезными, включая угрозу жизни и здоровью людей, финансовый ущерб и сбои в работе транспортных систем. Поэтому обеспечение кибербезопасности в автомобильной промышленности является жизненно важной задачей, которая требует совместных усилий автопроизводителей, поставщиков, правительств и автовладельцев:

автопроизводители и поставщики должны разрабатывать безопасные автомобили и компоненты, регулярно обновлять программное обеспечение и устранять уязвимости.

правительство должно разрабатывать и внедрять стандарты кибербезопасности, повышать осведомленность о киберугрозах и поддерживать исследования и разработки в области кибербезопасности.

автовладельцы должны следить за обновлениями программного обеспечения, использовать надежные пароли и методы аутентификации, а также быть внимательными к подозрительным сообщениям или действиям, связанным с их автомобилями.

Новые технологии и подходы, такие как использование блокчейна, искусственного интеллекта и архитектуры с нулевым доверием, могут помочь повысить уровень кибербезопасности автомобилей. Только совместными усилиями мы сможем сделать автомобили будущего безопасными и надежными.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Kaspersky ICS CERT. Кибербезопасность в автомобильной промышленности: как обеспечить соответствие положениям ЕЭК ООН [Электронный ресурс]. URL: <https://ics-cert.kaspersky.com/ru/reports/2023/03/22/> (дата обращения: 10.05.2024).

2. Kaspersky ICS CERT. Кибербезопасность в автомобильной промышленности: как обеспечить соответствие положениям ЕЭК ООН [PDF-версия]. URL: <https://ics-cert.kaspersky.com/ru/reports/2023/03/22/> (дата обращения: 10.05.2024).

3. Dzen. Кибербезопасность в автомобильной промышленности: как обеспечить соответствие положениям ЕЭК ООН [Электронный ресурс]. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5d8b73a96c8bcb00ae3c8e77/> (дата обращения: 10.05.2024).

4. Верхельст Э. и Воутерс Дж. Глобальное управление в сфере кибербезопасности: взгляд с позиции международного права и права ЕС [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/european-journal-of-international-law/article/abs/global-governance-in-cybersecurity-a-view-from-international-law-and-eu-law/> (дата обращения: 10.05.2024).

5. Князева, А. Хакеры уже атакуют автомобили. Каких кибератак стоит бояться? [Электронный ресурс]. URL: <https://420on.cz/magazine/technology/68985-hakery-uzhe-atakuyut-avtomobili-kakih-kiberatak-stoit-boyatsya> (дата обращения: 10.05.2024)1.

6. Развитие киберугроз в автоиндустрии [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/794344/> (дата обращения: 10.05.2024)2.

7. Борьба с автомобильными кибератаками – шведская лаборатория RISE Cyber [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/704644/> (дата обращения: 10.05.2024)3.

УДК 618.1

**Юрков<sup>1</sup> Н.К., Саторов<sup>2</sup> Т.И., Карамергеров<sup>3</sup> Т.Т.**

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2,3</sup> Военный институт Сил воздушной обороны, Алматы, Казахстан

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

### **ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР КАК ТРИГГЕР РАЗВИТИЯ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ**

**Аннотация.** Рассматривается непредсказуемость человеческого фактора во время сложившейся ситуации, оказывающего необратимое влияние на дальнейшее спонтанное развитие нештатной ситуации в сторону аварийной. Производится поиск путей предотвращения дальнейшего негативного развития.

**Ключевые слова:** человеческий фактор, нештатная ситуация, психологическая устойчивость, формирование навыка, адекватное поведение, оператор сложных технических систем

**Yurkov<sup>1</sup> N.K., Sattorov<sup>2</sup> T.I., Karamergerov<sup>3</sup> T.T.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2,3</sup> Military Institute of Air Defense Forces, Almaty, Kazakhstan

<sup>1,2,3</sup> kipra@pnzgu.ru

### **THE HUMAN FACTOR AS A TRIGGER FOR THE DEVELOPMENT OF AN EMERGENCY SITUATION**

**Abstract.** The article discusses the unpredictability of the human factor during a given situation, which has an irreversible impact on the further spontaneous development of an abnormal situation towards an emergency. The article also explores ways to prevent further negative developments.

**Keywords:** human factor, abnormal situation, psychological stability, skill formation, appropriate behavior, operator of complex technical systems

Один из авторов статьи имел богатый опыт «погружения» в нештатные ситуации. Владеет в совершенстве методикой подготовки операторов по управлению сложной техникой, адекватной оценки непредсказуемых нештатных ситуаций, сохранению психологической устойчивости и предотвращению возникновения аварийных ситуаций. А также имеет опыт локализации возникших аварий, ликвидаций самой аварии и негативных последствий аварии. Он прошёл большую практическую школу службы на атомных подводных лодках в качестве командира электромеханической боевой части.

Понятие человеческого фактора многогранное, многофакторное и многозначное. Явления развития событий в области транспорта, энергетики, эксплуатации сложных технических устройств, которые приводят, в лучшем случае к выходу из строя системы, или к возникновению и развитию аварийной ситуации.

Так что же такое «человеческий фактор», из каких элементов он состоит, как он проявляется и какие условия его проявления?

Давайте обратимся к словам С.Г. Горшкова, озвученные в эпиграфе. Эти слова знал наизусть в 70 – 80 -х годах весь военно-морской флот СССР. И если вдуматься в смысл сказанного, можно понять об истинных причинах человеческого фактора.

Неорганизованность – отсутствие должной внутренней организованности личности, подразделения, коллектива, предприятия.

«Организованность как качество личности – способность сбалансировать свой рабочий день, эффективно распределить силы и время, сконцентрироваться на поставленной задаче и выполнить все намеченное» (Ковалев П.Д. – автор энциклопедии качеств личности – [podskazki.info](http://podskazki.info). Организованность).

Поскольку любой коллектив состоит из совокупности личностей, большинство неорганизованных личностей формируют неорганизованный коллектив, не способном концентрироваться на поставленной задаче.

Отсутствие организованности – потенциал для возникновения аварии.

Безответственность – не желание брать ответственность за свои слова, поступки, действия на себя, склонность перекладывать ответственность на чужие плечи, привычка откладывать всё на потом. Безответственный человек – человек без тормозов и управления. От него можно ожидать всякое. На него невозможно положиться. Он, как и неорганизованный человек, сам этого не осознавая, становится спусковым крючком для начала аварии.

Безграмотность – страшное качество любого человека. Безграмотный человек действует не осознанно. Он не знает, как правильно действовать. Он либо не действует в нештатной ситуации, либо своими действиями её усугубляет.

Эти три психологических качества человека, обслуживающего сложную, потенциально опасную технику, являются тем спусковым крючком, запускающим необратимый процесс развития аварийной ситуации и создающим предпосылки к аварии.

Теперь возникает вопрос, а можно ли как-то купировать перечисленные отрицательные качества или сделать так, чтобы они не появлялись? Можно.

Для того, чтобы не эксплуатировали сложную, потенциально опасную технику неорганизованные люди, надо создать систему фильтров для допуска к эксплуатации



специалистов сложной, потенциально-опасной техники. Решение этого вопроса возможно только в масштабе государства.

Создание системы противоаварийной безопасности предполагает целый комплекс мероприятий:

Отбор из кандидатов для соответствующей подготовки к эксплуатации сложной, потенциально опасной техники. Для этой цели должны быть определены подходящие морально психологические качества. Разработаны критерии отбора кандидатов с использованием современных достижений психологической науки;

Подготовку соответствующих специалистов по специально проработанным программам. Они должны включать теоретическую и обильную практическую подготовку для формирования устойчивых навыков, воспитывающих организованность и ответственность кандидатов в специалисты, обслуживающих сложные, потенциально опасные системы и технические устройства;

Организовать периодическую (например, один раз в год) проверку теоретических знаний и практических навыков с использованием соответствующих тренажёров.

Кроме этого должна быть пересмотрена целая система образования, начиная от среднего и кончая высшим образованием. Эта система должна вобрать в себя всё самое лучшее из системы образования Советского Союза. И использовать современные научные достижения педагогики и психологии.

Только таким образом можно исключить или значительно ослабить негативное влияние человеческого фактора в нештатных ситуациях.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. РБЖ-ПЛ-82. Руководство по борьбе за живучесть подводной лодки. Издание 1982 года.
2. Бакаева Т. Н. Безопасность жизнедеятельности. Часть II: Безопасность в условиях производства: Учебное пособие. – М. : ФАИР – ПРЕСС, 2007. – С. 155–158
3. Воробьева, Е. Г. Человеческий фактор как причина техногенной катастроф. Г. Воробьева, В. С. Пантелеева // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2019. – № 1. – С. 105–107. – EDN AKERUM.
4. Мамонтов Е. В. Человеческий фактор и безопасность полетов при управлении воздушным движением // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 41–45.
5. Абрамов О. В. Некоторые решения проблемы управления техногенными рисками // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 13–22.

УДК 378.146

**Прохоров<sup>1</sup> В.Ю., Казарин<sup>2</sup> И.Н.**

<sup>1,2</sup> Колледж современных технологий имени Героя Советского Союза М.Ф. Панова, Москва, Россия

<sup>1,2</sup> prohorovv@yandex.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ И ОПТИМИЗАЦИЯ БЮДЖЕТА ВРЕМЕНИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы бюджета времени, отводимого на самостоятельную работу студентов очной формы обучения в ГБПОУ «Колледж современных технологий». В работе дан анализ имеющейся литературы по рассматриваемому вопросу, выявлены основные особенности процесса обучения.

**Ключевые слова:** студент, особенности обучения, техническая механика, сопротивление материалов, самостоятельная работа, затраты времени

**Prokhorov<sup>1</sup> V.Yu., Kazarin<sup>2</sup> I.N.**

<sup>1,2</sup> College advanced technologies of hero of the Soviet Union M.F. Panov, Moscow, Russia

<sup>1,2</sup> prohorovv@yandex.ru

## **RESEARCH OF THE ROLE AND OPTIMIZATION OF THE TIME BUDGET OF INDEPENDENT WORK OF STUDENTS WHEN STUDYING DISCIPLINES**

**Abstract.** The issues of the budget of time allotted for the independent work of full-time students at the SBPEI «College advanced technologies» are considered. The paper analyzes the available literature on this issue, identifies the main features of the training process.

**Keywords:** student, peculiarities of training, technical mechanics, resistance of materials, independent work, time consumption

### **Введение**

Документы реформы высшего и среднего специального образования в Российской Федерации ставят перед учебными заведениями задачи совершенствования учебно-воспитательного процесса, повышения качества подготовки и уровня квалификации специалистов.

В колледже современных технологий студенты получают подготовку по дисциплине технической механике и сопротивлению материалов. Эти дисциплины являются фундаментальными в подготовке специалистов, базой для изучения специальных дисциплин. Изучение этих дисциплин способствует расширению научного кругозора, повышению общей культуры студентов, развитию их мышления и выработке правильного материалистического мировоззрения. Качество подготовки студентов по этим дисциплинам существенным образом влияет на процесс их дальнейшего обучения в КСТ.

Цель настоящей работы – изучить особенности бюджета времени, отводимого на самостоятельную работу студентов, дать рекомендации по улучшению качества и эффективности учебной работы по изучаемым дисциплинам.

### **Основная часть**

В современных условиях объём научных знаний увеличивается лавинообразно. За 10-15 лет он удваивается, поэтому каждому поколению студентов приходится усваивать всё большее количество информации. В связи с этим повышается ценность каждой минуты. Время, как известно – универсальный измеритель. Как комплексный показатель в качестве единицы измерения его используют при учёте самых различных видов человеческой деятельности. Задача учебного заведения – научить студентов бережно расходовать время, ценить его, прививать им навыки научной организации умственного труда.

Научная организация труда (НОТ) в колледже – это сложная многофакторная научно-обоснованная система организационных, экономических, социально-психологических, психофизиологических и других мер, способствующая повышению эффективности как учебно-воспитательного процесса, так и других сторон деятельности колледжа.

Одним из элементов НОТ в колледже является изучение бюджета времени студентов. Без чёткого знания того, как он складывается, какие факторы влияют на него, где больше всего студент непроизводительно теряет время, где скрыты резервы, за счёт которых можно улучшить структуру учебного и свободного времени, без этого трудно говорить о внедрении НОТ в учебный и воспитательный процесс. Отсюда следует необходимость разработки и совершенствования методик изучения бюджета времени. Их сравнительный анализ позволит выявить лучшие методы, которые могут быть использованы широким числом работников учебных заведений.

### **Понятие бюджета времени**

Распределение затрат времени на определённые виды деятельности в течение суток (недели, месяца, года) составляет бюджет времени. В этом термине, прошедшем из политэкономии, уже ничего не осталось от первоначального значения

старофранцузского слова **bougette** – кожаный кошелек. Бюджет времени фиксирует (в часах) временные затраты, которые расходуются на те или иные виды деятельности, совершаемые в определённый промежуток времени.

Бюджет времени выступает своеобразной «моделью личности». Он является существенной особенностью, характеризующей образ жизни, быта, поведения как отдельного человека, так и социальной группы или даже нации в целом.

Бюджет времени, выступая как обобщённый, синтезированный показатель несёт исключительно богатую и многообразную информацию, которая даёт возможность делать выводы от самых эмпирических до сугубо теоретических. На основе его мы получаем через время количественную оценку качественно различных признаков. Знание общих данных об использовании времени даёт возможность создать определённое представление о человеке, группе, обществе.

В нашей стране интерес к изучению бюджета времени проявился ещё в первые годы советской власти (работы академика С.Г. Струмилина). В двадцатых – начале тридцатых годов подробно изучались бюджеты времени различных социально-профессиональных слоёв и групп, в том числе и студенчества. О направлении и размахе проводимых в то время исследований можно судить, например по публикациям тех лет: И. Васильев. Рабочий день студента, «Время». № 4, 1923; Бюджет времени пролетарского студента Пермского университета. Пермь, 1924; А. Васильев. Бюджет времени студента, «Время». № 4, 1925; В. Танаевский. Бюджет времени Вятского студенчества. Вятка, 1925; И. Бурдянский, М. Юровская. Рабочая нагрузка студента татарского коммунистического университета. Казань, 1926; Н. Марков. Бюджет времени студента кубанского педагогического института. «Научный работник». № 1, 1928 и др. данные, получившие в этих исследованиях, послужили основанием для рекомендаций, направленных на улучшение обучения студентов в вузах и решения других вопросов, связанных с подготовкой кадров советских специалистов.

В настоящее время изучение проблемы бюджета времени ведётся довольно интенсивно. Наряду с теоретическими работами В.Д. Патрушева, Г.А. Пруденского, В.А. Артёмова, В.И. Болгова и др. в последнее время опубликованы результаты некоторых прикладных исследований. Однако среди них мало работ (особенно обобщающих), связанных с учебным и свободным временем студентов. Хотя необходимость разработки подобных вопросов очевидна.

Точное значение бюджета учебного и внеучебного времени студентов диктуется требованиями научной организации труда учебных заведений. По отношению к социальной жизни учебных заведений бюджет времени выступает инструментом для изучения количественных и качественных показателей, характеризующих рациональность организации учебного процесса и действенность идейно-воспитательной работы среди студентов. Слово в зеркале, в нём отражаются как вопросы уже давно и успешно решённые советской высшей школой, так и проблемы, которые выдвинуты сегодняшним днём нашей жизни, требованиями научно-технического прогресса.

Структура бюджета времени

При построении модели бюджета времени можно исходить из классификации общего фонда времени, разработанной член-корреспондентом АН СССР Г.А. Пруденским (Пруденский Г.А. Время и труд. М. 1964). Эта классификация основывается на учёте существа видов деятельности применительно к работающему населению. Общий бюджет времени делится Г.А. Пруденским на две основные части:

1 – рабочее время, которое включает в себя нормальную продолжительность рабочего дня и время сверхурочных работ;

2 – внерабочее время, к которому относится всё остальное время.

Внерабочее время, в свою очередь, подразделяется на 4 укрупнённых подгруппы:

1 – внерабочее время, связанное с работой;

2 – время на домашний труд и другие бытовые потребности;

3 – время на удовлетворение естественных физиологических потребностей;

4 – свободное время.

В каждой из этих групп выделяются отдельные элементы затрат времени на отдельные виды деятельности. Такая структура бюджета времени получила признание научной общественности не только в нашей стране, но и за рубежом, свидетельством чего явилось использование её для сравнительного международного исследования бюджета городского населения в ряде стран Европы и Америки.

При построении рабочей модели бюджета времени такой специфической социально-профессиональной группы, какой является студенчество, необходимо скорректировать классификацию Г.А. Пруденского применительно к существу видов деятельности, наиболее типичных для изучения группы.

Социальной обязанностью студентов, как известно, является учёба. Систематическое овладение знаниями, посещение занятий и самостоятельная работа студентов по выполнению учебной программы является для общества социально-полезным

трудом, результатом которого оказывается воспроизводство рабочей силы высокой квалификации. Поэтому по отношению к студентам их рабочим временем будет являться время, связанное с учёбой, т.е. 1) учебные академические занятия (занятия, семинары, лабораторные, практические занятия и т.д.), и 2) самостоятельная работа над программным материалом.

Последний вид временных затрат в отличие от первого не регламентируется учебными планами и расписанием занятий, и поэтому его величина во многом определяется субъективными факторами. Однако, самостоятельная работа студентов неотделима от трудового процесса и входит составной частью в их рабочее время. Таким образом, общий фонд времени студентов распадается на две основные части: учебное (рабочее) и внеучебное время. В структуре внеучебного времени можно выделить следующие пять групп:

Внеучебное время, связанное с учёбой (затраты времени на передвижение к месту занятий, включая обратную дорогу), а также обслуживание в учебном заведении (гардероб), столовая, библиотека;

Время на удовлетворение физиологических потребностей (сон, уход за собой, питание);

Время на удовлетворение бытовых потребностей;

Свободное время;

Нераспределённое время.

Вариант социологической модели, которую можно использовать для изучения бюджета времени студентов представлена на рисунке.

Особенностью указанной модели является отнесение таких массовых форм научно-исследовательской работы студентов, как участие в научных кружках, работе в студенческих проектах, конструкторских и технологических бюро – к свободному времени. Сделано это потому, что научно-исследовательская работа студентов не стала пока обязательной частью учебного процесса, необходимой для выполнения учебного плана. Преследуя в первую очередь такие цели, как развитие исследовательских способностей студента, привить ему навыки научной работы, она является важным фактором дополнительной профессиональной подготовки. А все виды деятельности, относящиеся к этой подготовке, входят в структуру свободного времени.

Методы изучения бюджета времени

При изучении бюджета времени могут быть использованы различные методы хронометрии, интервью, метод моментных наблюдений, самофотография, заочный опрос (анкетирование), ретроспективный метод. Наиболее строгим в научном отношении является хронометраж. Это, пожалуй, единственный способ, позволяющий при изучении бюджета времени получить «... наиболее объективный, как писал В.И. Ленин, – наименее допускающий субъективные перетолкования факта» (Ленин В.И. Полное собрание сочинений. Т. 22, стр. 282). Но этот метод можно применять лишь тогда, когда учитываются затраты времени либо на отдельные рабочие операции. Обычно полагают, что возможность допущения ошибки студентом при заполнении им карты саморегистрации носит вероятностный характер. Зафиксированный результат может быть абсолютно точным и соответствовать действительному, а может быть несколько большим или меньшим, чем фактический расход времени на определённый вид деятельности.

При исследовании общего бюджета, т.е. распределения времени на различные виды деятельности в определённый календарный период – сутки, недели и т.д., – хронометраж, как основной метод обследования неприемлем. Вряд ли будет практически возможным, чтобы за лицом, бюджет времени которого изучается, «тенью» ходил хронометрист и фиксировал все временные затраты обследуемого. К тому же при таком методе нельзя охватить обследованием большую массу людей. А как отмечал В.И. Ленин, «... в общественной науке (как и в науке вообще) дело идёт о массовых явлениях, а не об единичных случаях» (Ленин В.И. Полное собрание сочинений. Т. 26, стр. 250). Вот почему наиболее соответствует целям исследования метод самофотографии суточного бюджета времени, который позволяет точно (в допустимых пределах) учитывать все затраты времени большого числа обследуемых лиц. Кроме того, в некоторых случаях самофотографию можно дополнять данными хронометража, моментных наблюдений, анализом объективных показателей по ведомостям успеваемости.

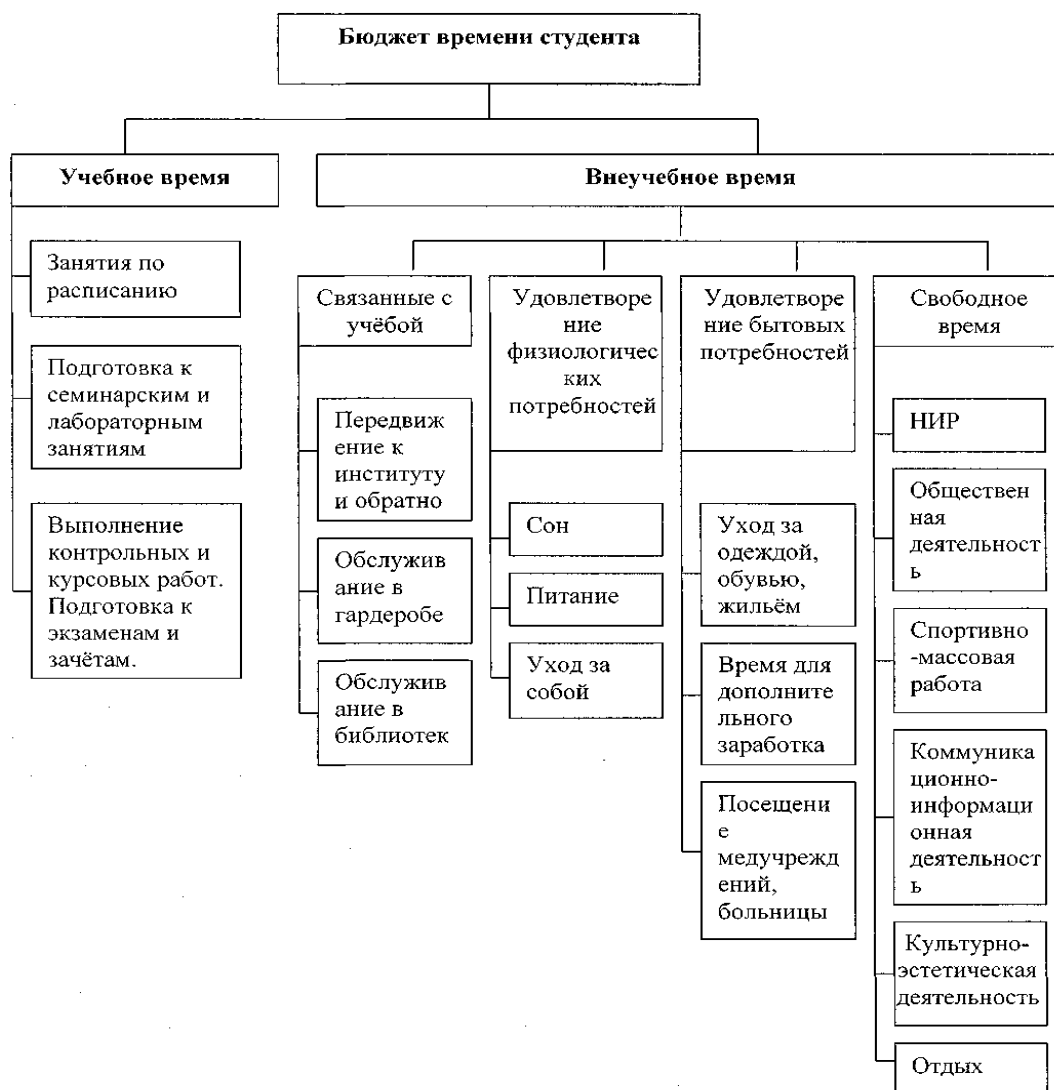


Рисунок - Вариант социологической модели для изучения бюджета времени студентов

При самофотографировании члены обследуемого коллектива сами заполняют специально разработанные карты саморегистрации времени, фиксируя в них все виды временных затрат. В дальнейшем исследовании приходится исходить не из показаний приборов, дающих безпогрешный результат, а оперировать теми цифрами, которые записал в карте сам студент, т.е. субъективными данными. А где гарантия того, что он не ошибся, или, хуже того, заведомо не исказил результат хронометража, чтобы предстать в более выгодном свете? Какова достоверность полученных данных?

Первый аргумент противников этого метода – возможность появления случайных ошибок при ежедневном заполнении карты саморегистрации. Конечно, стопроцентной гарантии того, что все обследуемые студенты не сделают ошибок и точно зафиксируют все затраты времени, нет. Возможно, что кто-то и запишет расход времени «на глазок». Но согласно закону больших чисел Пуассона при достаточно большом числе явлений, носящих вероятностный характер, отклонения от средних величин (ошибки) взаимно.

При достаточно большом числе саморегистраций бюджета времени те ошибки (в сторону увеличения и в сторону уменьшения действительных временных затрат) взаимно погашаются, нейтрализуются.

Сложнее обстоит дело с преднамеренным искажением результатов, вызванным желанием скрыть действительное положение дел. Может иметь место такая ситуация: студент прогуляет, допустим, 4 часа, а в карте саморегистрации укажет, что он присутствовал на лекции или самостоятельно работал с дополнительной литературой. Однако, если даже среди обследуемых студентов и будет какое-то число таких лиц, их ответы не смогут существенно исказить общий результат, т.к. средние величины определяются по большому числу опрошенных.

По-видимому, нет оснований ставить под сомнение возможности метода самофотографии только потому, что какое-то число студентов может быть необъективным при

заполнении карты самохронометража. С помощью этого метода проведено не одно исследование бюджета времени и правильность сделанных на его основе выводов подтверждаются практикой (Бюджет времени преподавателя и студентов, его социальная обусловленность. Наука, 1975. Бюджет времени студентов – одна из важнейших характеристик их образа жизни, Каунас, 1983).

Социологическое исследование, каким является изучение бюджета времени, связано со сбором, обработкой и анализом статистических данных, использованием закономерностей статистики. Почти все цифры, которыми оперируют при анализе бюджета времени, являются средними величинами, т.е. представляют собой результаты расчётов, сделанных на основе первичной статистической информации, собранной во множество данных. Они показывают не абсолютный расход времени, а в известной степени приблизительные затраты его на тот или иной вид деятельности.

Средние величины отражают тенденцию явления, в них выражается общее, типичное, а не случайное отдельное. Это типичное, закономерное проявляется только в том случае, когда для анализа берётся достаточно большое число событий, фактов. При малой совокупности закономерность просто не проявляется. Будучи средними величинами, данные, полученные в исследовании, характеризуют обследованную совокупность студентов в целом, а не какие-либо личности в отдельности. Средние величины применимы к группе, а не к отдельному индивиду.

Чтобы выяснить, как складывается структура бюджета времени студентов, нет необходимости проводить в учебном заведении сплошное обследование, т.е. фиксировать временные расходы абсолютно всех студентов. Это намного затруднит исследование, сделает его более трудоёмким. Кроме того, с ростом количества обследуемых может увеличиться и количество ошибок при сборе и обработке первичных данных, т.е. число так называемых процедурных ошибок.

Статистика выработала более экономные, но в тоже время достаточно достоверные способы несплошного исследования, одним из которых является выборочный метод (Конкрет Уильям. Методы выборочного исследования. М. 1976). Суть его заключается в том, что из общей массы наблюдений, подлежащих исследованию (генеральная совокупность), для непосредственного изучения отбирается только небольшая часть (выборочная совокупность), но отбор её проводится по строго определённой системе. Чтобы получить такие обобщающие результаты, которые будут репрезентативны (представительны) для всей совокупности в целом, т.е. будут характеризовать её достаточно правильно.

О необходимости изучения и совершенствования бюджета времени, отведённого для самостоятельной работы студентов

Последние документы министерства образования РФ, посвящённые реформе высшей школы, нацеливают педагогические коллективы учебных заведений на дальнейшее повышение эффективности обучения и качества выпускаемых специалистов. В современных условиях перехода на рельсы интенсивного развития одним из основных путей повышения эффективности обучения является совершенствование форм и методов преподавания.

Традиционный метод обучения основан на иллюстративно-просветительском способе передачи знаний, на получении готовой информации, что ведёт к недостаточному формированию системы внутренних мотивов, как основы целенаправленного активного развития мышления. К настоящему времени имеется потребность и созрели условия для обновления дидактической, психолого-педагогической, методической основы преподавания с учётом современных достижений науки и техники. Во многих учебных заведениях страны осуществляется переход от преимущественно регламентирующих, контролирующих форм и методов обучения к развивающим, активизирующим, проблемным, обеспечивающим порождение познавательных и профессиональных мотивов, интереса к самостоятельной работе. Совершенствуется система обучения и её основные звенья: цели и содержание, формы, методы и средства обучения. Происходит переориентация с преимущественно информативных на активные формы и методы обучения, на использование широких возможностей самостоятельной работы студентов, включающих элементы научного поиска исследовательской и профессиональной деятельности. Такая перестройка педагогического процесса получила название активного или развивающего обучения.

В условиях нарастающего увеличения научной информации важно правильно определить в каждом преподаваемом предмете те фундаментальные разделы, без усвоения которых невозможно изучение дисциплины, и использовать при их преподавании все новейшие достижения педагогики и психологии. При этом необходимо стремиться не просто дать студенту какой-то набор данных, необходимых для его профессионального функционирования, а научить его учиться. В наибольшей степени это относится к прикладным наукам, где в силу происходящей научно-технической революции техника, технология и методы исследований стареют чрезвычайно быстро и обновляются

в течение нескольких лет. В этих условиях представляется важным внедрение в учебный процесс элементов проблемного обучения [1, 2]. Главное отличие объяснительного обучения от проблемного заключается в изменении вида деятельности обучаемых. Если при первом учебная деятельность в основном направлена на усвоение знаний, то при проблемном обучении – на поиск и усвоение знаний. При этом создаются предпосылки для формирования тех психических структур, которые составляют ядро творческой деятельности. При проблемном обучении учащиеся не ищут готовых знаний (репродуктивно-поисковый метод), а сами выводят эти знания (продуктивно-поисковый метод). Необходимо отметить, что отсутствует единая точка зрения на проблемный метод обучения: одни трактуют его как способ обучения, другие – как принцип обучения, третьи – как способ изложения материала.

#### **Закключение**

В настоящее время совершенствование учебно-воспитательного процесса в большинстве учебных заведений разного профиля ведётся по планам научно-исследовательских работ, в которых предусматривается определение оптимального содержания образования, согласование преподавания по всем дисциплинам, устранение дублирования учебного материала, организация самостоятельной работы студентов [3, 6].

Самостоятельная работа студентов оказывает решающее влияние на качество подготовки специалистов: отмечено в [7], что из числа студентов, не систематически занимающихся внеаудиторной подготовкой, 60 % на экзамене получили неудовлетворительные оценки. Путём анализа анкетных материалов авторы выявили связь между успеваемостью и режимом дня студентов.

Самостоятельная работа студентов – самый трудный вид учебной деятельности, важный и необходимый. Каким бы ни был учебный процесс, какими квалифицированными ни были преподаватели, ничему нельзя научить студента, если он не будет самостоятельно работать.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Невский В.П. Один из видов обучения. Вестник высшей школы. 1982. № 1. С. 24-26.
2. Шейнфельд В.Л. Используя метод аналогий. Вестник высшей школы. 1982. № 3. С. 19-20.
3. Прохоров, В.Ю. Воспитательная работа с молодежью в организациях среднего профессионального образования. Тренинг как метод активного обучения / В.Ю. Прохоров, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 238-240.
4. Прохоров, В.Ю. STORITELLING как современная стратегия преподавания / В.Ю. Прохоров, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2019. № 2. С. 149-151.
5. Прохоров, В.Ю. Помощник в образовательном процессе среднего профессионального обучения / В.Ю. Прохоров, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2018. № 1. С. 315-317.
6. Прохоров, В.Ю. Психолого-педагогическое сопровождение духовно-нравственного развития будущего специалиста / В.Ю. Прохоров, Ф.М. Осипов, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2025. Т. 1. С. 426-431.
7. Глущенко А.Г. и др. Факторы, влияющие на работоспособность и функциональное состояние студентов I курса. Гигиена и санитария. 1981. № 3. С. 34-37.

УДК 618.1

**Романенко<sup>1</sup> Ю. А., Исаева<sup>2</sup> Т. А.**

<sup>1,2</sup> Филиал Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого Министерства обороны Российской Федерации в г. Серпухове, Серпухов, Россия

<sup>1</sup> romanenko-55@inbox.ru

<sup>2</sup> mamontenok74@mail.ru

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ КАДРОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ**

**Аннотация.** Рассматривается цифровизация военного образования, внедрение в вузы Министерства обороны РФ специального программного обеспечения «Образование-МО», организованного в виде комплекса различных модулей, выполняющих функции ввода, хранения и визуализации данных.

**Ключевые слова:** цифровая трансформация военного образования, электронная информационно-образовательная среда военного вуза, траектории обучения

**Romanenko<sup>1</sup> Yu. A., Isaeva<sup>2</sup> T. A.**

<sup>1,2</sup> Branch of the Military Academy of Strategic Rocket Troops named after Peter the Great of the Ministry of Defense of the Russian Federation in Serpukhov, Serpukhov, Russia

<sup>1</sup> romanenko-55@inbox.ru

<sup>2</sup> mamontenok74@mail.ru

### **IMPROVEMENT OF THE MILITARY TRAINING SYSTEM IN THE CONTEXT OF THE DIGITAL TRANSFORMATION OF EDUCATION**

**Abstract.** The article talks about the digitalization of military education. The introduction of special Education-MO software into universities of the Ministry of Defense of the Russian Federation, organized as a complex of various modules that perform the functions of data input, storage and visualization.

**Keywords:** digital transformation of military education, electronic information and educational environment of a military university, learning trajectories

Активное развитие процесса цифровой трансформации образования определяется существенными системными изменениями, произошедшими и происходящими в сфере образования (как позитивными, так и негативными), в связи с активным и систематическим использованием цифровых технологий и реализацией в образовательной практике результатов достижений научно-технического прогресса современного информационного общества массовой глобальной коммуникации.

Цифровой трансформации подверглись следующие процессы в сфере образования: предоставление образовательных услуг; создание цифровых образовательных ресурсов; информационно-методическое обеспечение учебного процесса; информационная деятельность; информационное взаимодействие как между субъектами образовательного процесса, так и с цифровым образовательным ресурсом; управление образованием; информационное обеспечение деятельности образовательной организации; организационное управление деятельностью образовательной организации; обеспечение информационной безопасности личности субъектов образовательного процесса. Влияние цифровой трансформации распространяется на всю сферу образования по следующим направлениям: учебно-воспитательный процесс; процессы создания и использования электронных или цифровых образовательных ресурсов; корректировка состава информационно-образовательной среды (высокотехнологичные программно-аппаратные средства и устройства, в т. ч. мобильные; средства обеспечения удаленного доступа к образовательному контенту; цифровой образовательный ресурс; средства и системы автоматизации администрирования и управления образовательной организацией и пр.).

Сам процесс цифровой трансформации образования инициирует совершенствование всей системы образования, в частности: обновление, модификацию всех учебно-методических материалов, в том числе содержание и структуру различных образовательных программ, компетенций, средств оценки учебных достижений и управления образовательным процессом; организацию и оборудование научно-исследовательской, экспериментальной деятельности обучающихся; структуру и организацию подготовки и переподготовки педагогических и управленческих кадров в области использования цифровых технологий при решении профессиональных задач; развитие информационной инфраструктуры образовательной организации [1].

Цифровая трансформация образования началась более 40 лет назад и стремительными темпами внедряется во все сферы образования, значительно влияя на формирование личности. Цифровая трансформация становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности вузов, определяя их умение адаптироваться к изменяющимся потребностям молодежи [2, 3]. Цифровая трансформация военного вуза представляет



собой комплексное преобразование своей деятельности, охватывающее переход к новым моделям обучения, каналам коммуникации, основанным на управлении данными с использованием цифровых технологий.

В сфере военного образования разрабатывается своя электронная информационно-образовательная среда (ЭИОС) (рис.1), представляющая систему информационных и образовательных ресурсов, телекоммуникационных и информационных технологий, соответствующих технологических средств, обеспечивающих условия для реализации образовательных программ при подготовке военных специалистов, ключевым элементом которой является специальное программное обеспечение (СПО) управления образовательной деятельностью в рамках Министерства обороны РФ (МО РФ) «Образование-МО».



Рисунок 1 - Электронная информационно-образовательная среда военного вуза

Происходит переход от бумажного документооборота к защищенной среде. Строится единая база данных, где все процессы отслеживаются в реальном времени. Это позволяет прогнозировать успеваемость и автоматизировать допуски к закрытой информации. Этапы цифровой трансформации представляют собой последовательный процесс глубокой перестройки всех аспектов деятельности военного вуза с использованием цифровых технологий. Каждый этап отражает уровень интеграции цифровых решений в управленческие и образовательные процессы (рис.2).

Наличие конфиденциальной информации мешает использовать облачные сервисы и отлаженные гражданские платформы. Возникает необходимость разрабатывать свои аналоги на закрытых сегментах.

СПО «Образование-МО» организовано в виде комплекса различных модулей, выполняющих функции ввода, хранения и визуализации данных. В интерфейс СПО «Образование-МО» входят закладки по видам деятельности:

Повседневная деятельность. Образовательная деятельность. Методическая деятельность. Научная деятельность. Отчетность. Администрирование. Справка.

И закладки прямого доступа:

Расписание занятий. Журнал занятий. Личные дела. Отчетность. Личное расписание. Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК). Личный кабинет. Библиотека.

Входящие в СПО электронные учебно-методические комплексы по каждой дисциплине позволяют курсанту самостоятельно осваивать учебный материал, который он пропускает из-за наличия нарядов, а также, что очень актуально в настоящее время, сможет восполнять пробелы в знаниях не только высшей школы, но и школьного курса, т.к. в библиотеку СПО обязательно должны быть включены электронные учебные пособия по математике, физике и русскому языку для сдачи вступительных испытаний. В условиях СВО в военные вузы поступает много молодых людей, окончивших школу несколько лет назад.

В структуру ЭУМК входит восемь папок:

Учебная программа учебной дисциплины и тематический план ее изучения.

Тексты лекций и их презентации.

Задания обучающимся на семинар.

Задания обучающимся на практические занятия и другие виды занятий.

Задания обучающимся на промежуточную аттестацию, перечень вопросов.

Задания обучающимся на итоговый междисциплинарный экзамен.

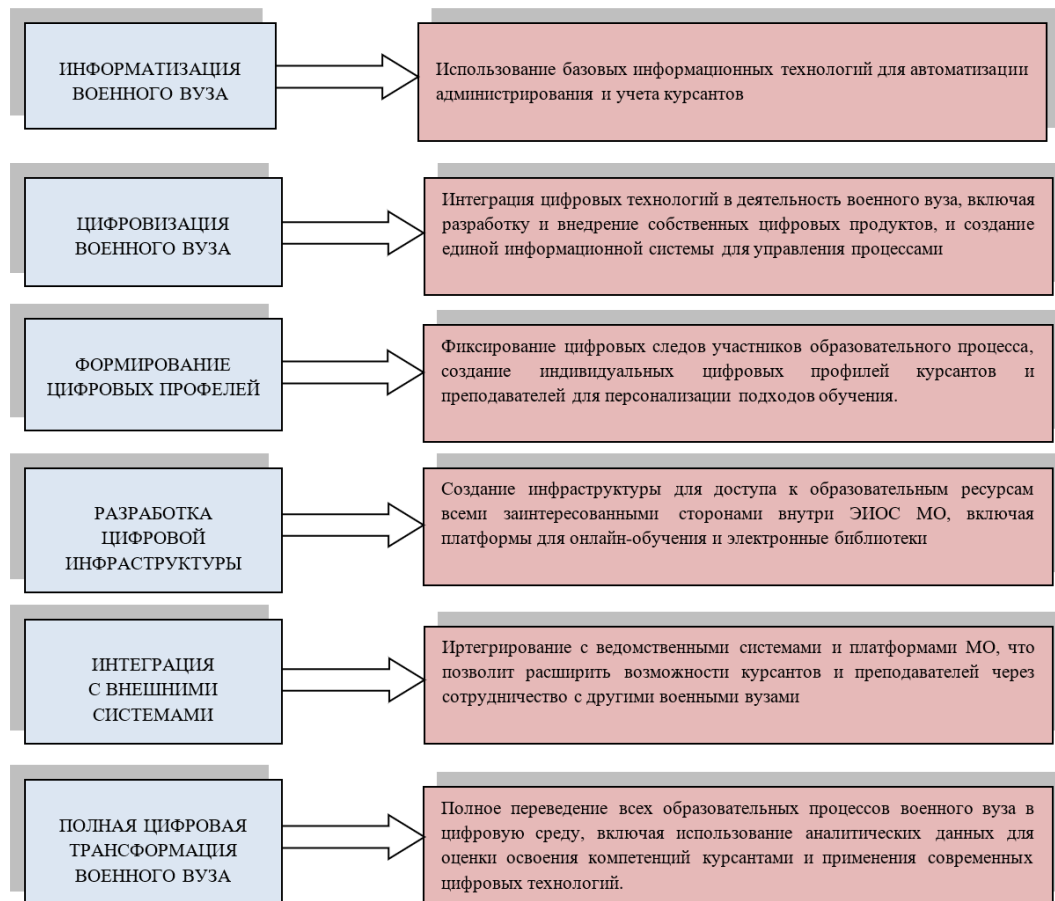


Рисунок 2 - Этапы цифровой трансформации военного вуза

Основная академическая литература: учебники или учебные пособия, созданные в программе «Библио».

Дополнительная литература, подобранная преподавателем и содержащаяся в электронной образовательной среде военного вуза.

Электронная учебная литература, создается, преподавателями военных вузов и является неотъемлемой частью обучающей системы, ее содержание должно соответствовать целям профессиональной подготовки военных специалистов, оно должно быть связанным с содержанием, реализуемым другими элементами комплекса, ориентироваться на широкое использование в учебном процессе форм и методов обучения. Электронному учебнику в составе СПО отводится одна из ключевых ролей по активизации творческой самостоятельной работы курсантов путем диагностического целеполагания и аргументированной мотивации, наличия системы управления познавательной деятельностью обучающихся при поэтапном переводе из исходного состояния обученности в требуемое, развития творческого мышления с учетом индивидуальных особенностей, обеспечения возможности вариативного выбора траектории обучения в зависимости от целей и сложности решаемых учебных задач [4].

Применение специализированных информационных и цифровых технологий в военном вузе позволит обеспечить процесс обучения курсанта от абитуриента до выпускника-офицера. СПО «Образование-МО» получив тщательную и методическую доработку обеспечит гибкость, доступность к электронным учебно-методическим комплексам дисциплин, поможет организовать самостоятельную работу курсанту и выстроить индивидуальную траекторию обучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роберт И.В., Мухаметзянов И.Ш., Лопанова Е.В. Цифровая трансформация образования: теория и практика // Монография – 2022. – Омск – 178 с.
2. Еленева Ю.Я. Цифровая трансформация образовательных организаций высшего образования: современное состояние, задачи, риски // Ю.Я. Еленева, А.А. Можаровская, Д.И. Демушкин // Экономика, предпринимательство и право. – 2024. – Т.14.
3. Глухова Е.В., Шульга Т.И. Коммуникационные стратегии вузов в условиях цифровой трансформации // Вестник современного образования. 2023.
4. Романенко Ю.А., Иващенко М.В., Иващенко А.В. Методические рекомендации научно-педагогическим работникам по разработке электронных учебных изданий // Методическое пособие – 2021 – Серпухов – 70 с.

УДК 378:004

**Колбанев<sup>1</sup> М. О. , Шамин<sup>2</sup> А. А.**

<sup>1,2</sup> Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия

<sup>1</sup> mokolbanev@mail.ru

<sup>2</sup> al.shamin@mail.ru

### **СТРАТИФИЦИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ**

**Аннотация.** Представлена стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики как сложной программно-интенсивной информационной системы. Обосновывается необходимость многоуровневого описания цифровых систем на основе теории иерархических многоуровневых систем Месаровича, Мако и Такахары. Выделены два блока страт: инфраструктурные (физические источники данных, сети, облачно-туманные вычисления) и предметно-ориентированные (управление данными, цифровые платформы, экосистемы, рынки). Особое внимание уделено роли метаданных как основы структурирования цифровой информации и обеспечения совместимости компонентов. Дополнительно рассматриваются послойная и эшелонированная модели цифровой экономики, отражающие уровни принятия решений и управления соответственно. Показано, что архитектурный подход обеспечивает системность, масштабируемость и устойчивость цифровой трансформации. Работа представляет интерес для исследователей, разработчиков архитектур цифровых систем и государственных регуляторов.

**Ключевые слова:** архитектура цифровой экономики, киберпространство, метаданные, послойное описание, стратификация, цифровая трансформация, цифровая экономика, цифровые платформы, эталонные модели, эшелоны управления

**Kolbanev<sup>1</sup> M.O. , Shamin<sup>2</sup> A.A.**

<sup>1,2</sup> Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Russia

<sup>1</sup> mokolbanev@mail.ru

<sup>2</sup> al.shamin@mail.ru

### **STRATIFIED ARCHITECTURE OF THE DIGITAL ECONOMY**

**Abstract.** The article presents a stratified architectural model of the digital economy as a complex software-intensive information system. The necessity of a multi-level description of digital systems based on the theory of hierarchical multi-level systems by Mesarovich, Maco, and Takahara is justified. Two blocks of strata are highlighted: infrastructural (physical data sources, networks, cloud-fog computing) and domain-oriented (data management, digital platforms, ecosystems, markets). Special attention is paid to the role of metadata as the basis for structuring digital information and ensuring component compatibility. Additionally, layered and echeloned models of the digital economy are considered, reflecting decision-making and management levels, respectively. It is shown that the architectural approach provides systemacity, scalability, and sustainability of digital transformation. The work is of interest to researchers, developers of digital system architectures, and government regulators.

**Keywords:** digital economy architecture, cyberspace, metadata, layered description, stratification, digital transformation, digital economy, digital platforms, reference models, management echelons

Цифровая экономика представляет собой сложную, программно-интенсивную и цифровую информационную систему, в которой данные выступают в качестве нового фактора производства (рис. 1), а программное обеспечение – как ключевой инструмент трансформации экономических процессов [1,2]. Её функционирование невозможно без устойчивой, гибкой и стандартизированной архитектуры, обеспечивающей совместимость, масштабируемость и безопасность взаимодействия миллионов компонентов – от сенсоров интернета вещей до глобальных цифровых платформ. В условиях стремительной цифровизации всех сфер жизни актуализируется задача системного описания архитектуры цифровой экономики, основанного на принципах теории сложных систем, кибернетики и стандартизации информационных процессов. Цифровая экономика занимает наиболее специфический уровень в иерархии сложных систем: она является подмножеством цифровых и аналого-цифровых систем, которые, в свою очередь, представляют собой класс сложных вероятностных систем по классификации Г. Саймона [3]. Ключевым дифференцирующим признаком выступает интенсивное использование программного обеспечения как инструмента трансформации экономических процессов.

Одним из ключевых методологических подходов к решению этой задачи является стратифицированное описание, предложенное в работах Месаровича, Мако и Такахары, которое позволяет декомпозировать сложность системы на иерархически организованные уровни абстрагирования – страты, слои и эшелоны [4]. Такой подход не только упрощает понимание структуры цифровой экономики, но и обеспечивает основу для проектирования открытых, совместимых и устойчивых цифровых экосистем [5].

Цифровая экономика обладает фундаментальными свойствами сложных систем: она состоит из большого числа взаимосвязанных компонентов, проявляет эмерджентность и демонстрирует нелинейную динамику [6]. В соответствии с классификацией

Герберта Саймона, такие системы относятся к категории очень сложных вероятностных систем, которые не поддаются точному описанию, но могут быть структурированы через иерархические модели [3]. Архитектурное описание таких систем строится на трёх взаимодополняющих принципах: открытости, функциональности и многоуровневости. Открытость обеспечивает обмен информацией с внешней средой через стандартизированные интерфейсы (рис. 2). Функциональность позволяет рассматривать систему как «чёрный ящик», преобразующий входные данные в выходные по правилу. Многоуровневость, в свою очередь, позволяет описывать взаимодействие на разных уровнях абстракции [7–9].

Эти принципы лежат в основе эталонных моделей, таких как ЭМВОС (OSI/RM) и модель МИС, которые задают архитектуру взаимодействия в цифровой среде через строго определённые уровни и интерфейсы [10–12].

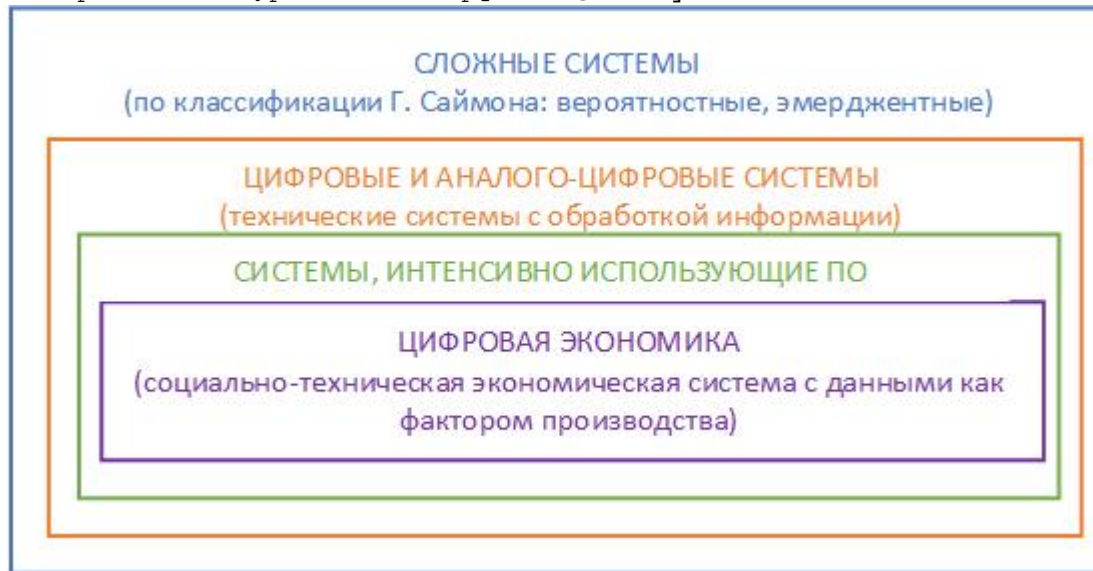


Рисунок 1 - Иерархическая вложенность множеств: место цифровой экономики в классификации сложных систем

На основе анализа свойств цифровых систем предложена семиуровневая стратифицированная модель архитектуры цифровой экономики (рис. 3), которая делится на две группы уровней. Инфраструктурные страты (1–3) обеспечивают физическую и вычислительную основу цифровой экономики. Предметно-ориентированные страты (4–7) реализуют экономические функции, рыночные взаимодействия и создание ценности.



Рисунок 2 - Аспекты открытых систем

Страта 1 включает физические законы и источники данных. Она включает технологии аналого-цифрового преобразования, сенсоры, радиотехнические и квантовые системы, формирующие цифровой след реального мира. Здесь реализуется теорема Котельникова, обеспечивающая корректное оцифровывание аналоговых процессов. Страта 2 охватывает сети сохранения, распространения и обработки данных. Она



охватывает телекоммуникационную инфраструктуру (включая 5G, тактильный интернет, интернет вещей), где данные передаются в виде кадров, пакетов и сегментов с добавлением метаданных для маршрутизации и контроля целостности. Страта 3 обеспечивает вертикально распределённую обработку данных, где облако отвечает за централизованную аналитику, туман – за обработку на границе сети, а роса – за автономную работу локальных устройств.



Рисунок 3 - Стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики

Страта 4 включает управление данными и их анализ. Она включает хранилища (озера данных), базы данных (SQL/NoSQL), OLAP-системы и методы Data Mining, которые превращают «сырые» данные в информацию и знания. Страта 5 представляет собой виртуальные среды для координации взаимодействия производителей и потребителей, основанные на принципах ХaaS («всё как сервис») и открытых API. Страта 6 обеспечивает межплатформенное взаимодействие через «цифровой кодекс», стандарты и соглашения о совместимости. Страта 7 формирует новые бизнес-модели, где посредники заменяются алгоритмическим управлением.

Центральным технологическим приёмом в архитектуре цифровой экономики является использование метаданных – данных о данных, которые обеспечивают идентификацию, поиск, интерпретацию и интеграцию цифровых ресурсов. Без метаданных цифровые блоки теряют контекст и становятся бесполезными для анализа. Метаданные не просто сопровождают цифровой блок данных, они формируют его информационную идентичность в киберпространстве. В рамках стратифицированной архитектуры цифровой экономики метаданные выполняют три взаимосвязанные функции, обеспечивающие целостность и смысловую насыщенность цифрового блока данных.

Во-первых, они описывают структуру блока данных, указывая его формат, размер, тип кодировки, порядок следования полей, наличие контрольных сумм и другие технические характеристики, необходимые для корректной обработки на соответствующей страте архитектуры. Во-вторых, метаданные обеспечивают семантическое наполнение, фиксируя смысл данных: к какому объекту или явлению они относятся, в каком контексте были получены, какие единицы измерения используются и какова степень их достоверности. В-третьих, метаданные содержат информацию о пространственно-сетевой привязке блока данных в киберпространстве – включая IP-адрес источника, временную метку создания, идентификатор устройства, географические координаты, а также принадлежность к определённому цифровому потоку или транзакции.

В совокупности эти три аспекта формируют информационную идентичность цифрового ресурса, делая его управляемым, интерпретируемым и локализуемым в распределённой цифровой среде. Без такой триады – структура, смысл, местоположение – данные теряют статус управляемого информационного ресурса и превращаются в неструктурированный цифровой «мусор», не подлежащий аналитической обработке или интеграции. Этот принцип особенно критичен на стыке инфраструктурных и предметно-ориентированных страт: именно метаданные обеспечивают преемственность

между физическим уровнем (где фиксируется сигнал) и семантическим уровнем (где данные обретают экономическое или социальное значение).

Помимо стратификации, архитектура цифровой экономики описывается через слои (уровни принятия решений) и эшелоны (уровни управления). В рамках государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» выделяются три эшелона (рис. 4).



Рисунок 4 - Эшелонированная модель управления цифровой трансформацией

Эшелон 1 представляет технологическую среду (разработка сквозных технологий). Эшелон 2 представляет социальную среду (правовое регулирование, образование, безопасность). Эшелон 3 представляет рынки и отрасли (инициативная цифровизация бизнеса). Послойный подход применяется, например, в медицине, где услуги строятся от базовых процедур к персонализированному уходу, или в вычислениях – от росы к облаку.

Предложенная в статье семиуровневая стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики представляет собой не просто концептуальную схему, а методологическую основу для системного описания и проектирования сложных цифровых экосистем. В отличие от чисто технологических или управленческих подходов, данная модель объединяет инфраструктурную, информационную, платформенную и социально-экономическую реальности в единую иерархическую структуру, где каждый уровень (страта) имеет четкое функциональное назначение и автономию описания.

Важно подчеркнуть, что стратификация – это не произвольное деление, а следствие фундаментальных свойств сложных систем, описанных в работах Месаровича, Мако и Такахары. Принцип независимости языков описания на разных стратах позволяет избежать двух крайностей: избыточной детализации, затрудняющей управление, и чрезмерной абстракции, лишаящей модель практической применимости. Например, разработчик облачной инфраструктуры (страта 3) может не знать специфики бизнес-модели В 2 С -маркетплейса (страта 7), но благодаря стандартизированным интерфейсам и метаданным эти уровни взаимодействуют прозрачно и предсказуемо.

Тем не менее, стоит отметить ограничения модели. Во-первых, она предполагает иерархическую стабильность, тогда как реальные цифровые экосистемы часто демонстрируют сетевые, децентрализованные или даже хаотические структуры. Во-вторых, модель акцентирует внимание на структурной и функциональной сторонах, в меньшей степени затрагивая этические, культурные и когнитивные аспекты цифровой трансформации (например, цифровую усталость, информационные «пузыри», алгоритмическую предвзятость).

Таким образом, предложенная модель не претендует на исчерпывающее описание цифровой экономики, но обеспечивает методологически устойчивый каркас, в рамках которого могут развиваться как технологические решения, так и управленческие и регуляторные стратегии. Её главная ценность – в том, что она делает сложность управляемой, превращая цифровую трансформацию из хаотического процесса в осознанное архитектурное проектирование. Архитектура цифровой экономики – это не статическая схема, а динамическая, многоуровневая структура, построенная на принципах стратификации, открытости и стандартизации. Предложенная семиуровневая модель позволяет системно подходить к проектированию цифровых экосистем, обеспечивая совместимость между физическими, информационными и социально-экономическими компонентами.

Будущее цифровой экономики зависит не от скорости внедрения отдельных технологий, а от целостности и устойчивости её архитектуры, спроектированной с учётом системной сложности, этических норм и стратегических целей развития общества.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Колбанёв М. О., Верзун Н. А., Омелян А. В. Сетевая архитектура цифровой экономики. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2018. 156 с.
2. Глазьев С. Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: Владар, 1993. 310 с.
3. Саймон Г. Науки об искусственном. М.: Едиториал УРСС, 2004. 142 с.
4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
5. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Технологическая платформа четвертой промышленной революции // Геополитика и безопасность. 2016. № 2 (34). С. 73–77.
6. Von Bertalanffy L. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968.
7. Кожанов Ю. Ф., Колбанев М. О. Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения // СПб.: ГУАП, 2009. 258 с.
8. Микадзе С. Ю., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Модель информационного взаимодействия для предприятий сервиса // Приборостроение. 2014. № 9. С. 10–14.
9. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омелян А. В. Введение в инфокоммуникационные технологии и сети Future Networks. СПб.: СПбГЭУ, 2016. 51 с.
10. ISO/IEC 7498-1:1994. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model.
11. Смоленцева Т.Е., Пприходько Н.А. Единое информационное пространство как фактор повышения качества разработки программного обеспечения // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2025. Т.2. С. 345–348.
12. Буцкий Д.О., Цветков В.Э., Королев П.С., Полесский С.Н., Ландер Л.Б., Мкртчян Г.А., Зубрильцев Е.Е., Сулова А.А., Мешочков Д.М. Обзор и анализ современных CAQ-систем для управления качеством технологического процесса на предприятиях // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2025. Т.2. С. 103–106.

УДК 004.9

**Заров<sup>1</sup> Е.В., Терехин<sup>2</sup> М.А., Иващенко<sup>3</sup> А.В., Головнин<sup>4</sup> О.К.**

1,2,3,4 Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

1,2,3,4 terexin.m.a@yandex.ru

## **ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПАТОЛОГИЙ**

**Аннотация.** Рассматриваются технологии интеллектуального анализа МРТ-изображений головного мозга, предназначенные для выявления патологий и повышения эффективности поддержки диагностических решений. Предложена концептуальная модель интеллектуального анализа, включающая этапы подготовки и предварительной обработки данных, выделения областей интереса, сегментации и разметки изображений, извлечения и отбора количественных признаков, формирования и валидации аналитической модели, а также её практического применения для классификации патологий, прогнозирования течения заболевания и сегментации патологических зон. Особое значение в предложенной модели отведено экспертной верификации и последующему дообучению системы, что обеспечивает её адаптивность. Практическая значимость работы заключается в формализации целостной информационно-аналитической системы, ориентированной на повышение точности диагностики и эффективности поддержки врачебных решений.

**Ключевые слова:** интеллектуальный анализ изображений, МРТ, головной мозг, выявление патологий, машинное обучение, поддержка диагностических решений, медицинские информационные технологии

**Zarov<sup>1</sup> E.V., Terekhin<sup>2</sup> M.A., Ivashchenko<sup>3</sup> A.V., Golovnin<sup>4</sup> O.K**

1,2,3,4 Samara State Medical University, Samara, Russia

1,2,3,4 terexin.m.a@yandex.ru

## **TECHNOLOGIES OF INTELLIGENT ANALYSIS OF HUMAN BRAIN IMAGES FOR DETECTING PATHOLOGIES**

**Abstract.** The article discusses technologies for the intelligent analysis of MRI images of the brain, designed to identify pathologies and improve the effectiveness of diagnostic decision support. A conceptual model of intelligent analysis is proposed, which includes the steps of data preparation and preprocessing, identification of areas of interest, segmentation and labeling of images, extraction and selection of quantitative features, formation and validation of an analytical model, as well as its practical application for the classification of pathologies, forecasting the course of the disease and segmentation of pathological zones. The proposed model places special emphasis on expert verification and subsequent retraining of the system, which ensures its adaptability. The practical significance of this work lies in the formalization of a comprehensive information and analytical system aimed at improving the accuracy of diagnostics and the effectiveness of medical decision support.

**Keywords:** intelligent image analysis, MRI, brain, pathology detection, machine learning, diagnostic decision support, medical information technologies

Развитие современной медицины сопровождается активным внедрением цифровых, телемедицинских и персонализированных информационно-измерительных решений, ориентированных на повышение доступности, непрерывности и точности диагностического контроля. Исследования, посвящённые созданию каналов измерения физиологических параметров в составе телемедицинских систем амбулаторного мониторинга, а также разработке портативных устройств регистрации биосигналов, свидетельствуют о формировании устойчивой тенденции к интеграции методов приборостроения, обработки данных и интеллектуальной поддержки клинических решений в единую технологическую среду [1, 2].

Анализ медицинских изображений головного мозга является значимым направлением развития информационных технологий в медицине, поскольку методы нейровизуализации играют важную роль в диагностике, лечении и мониторинге заболеваний центральной нервной системы. Магнитно-резонансная томография позволяет получать комплексную информацию о состоянии мозговой ткани, включая структурные и функциональные характеристики патологического процесса [3].

Методы МРТ применяются при опухолевых, сосудистых, демиелинизирующих и нейродегенеративных заболеваниях, в том числе при когнитивных нарушениях, рассеянном склерозе, аневризмах и болезни Альцгеймера [4–7]. Вместе с тем традиционная визуальная интерпретация МРТ во многом зависит от опыта специалиста и не всегда позволяет выявлять скрытые количественные различия между нормальной и патологически изменённой тканью.

В связи с этим всё большее значение приобретают технологии интеллектуального анализа изображений, основанные на радиомике, машинном и глубоком обучении. Их применение позволяет извлекать из МРТ количественные признаки, характеризующие текстуру, форму, интенсивность сигнала и пространственную организацию патологических очагов, а также использовать эти данные для автоматизированной классификации, прогнозирования и поддержки принятия врачебных решений [8]. Современные исследования показывают, что радиомические признаки перифокального отёка могут использоваться для прогнозирования зон рецидива глиобластомы [9].

Применение объединённых мультипараметрических МРТ-изображений и автоматизированного машинного обучения обеспечивает высокую точность классификации глиом [10]. Использование моделей, сопоставляющих МРТ-признаки с морфологическими



характеристиками ткани, позволяет выполнять локальное определение степени опухоли [11]. Сочетание автоматической сегментации и радиомического анализа создаёт возможность прогнозирования молекулярных подтипов глиом по неинвазивным данным МРТ [12].

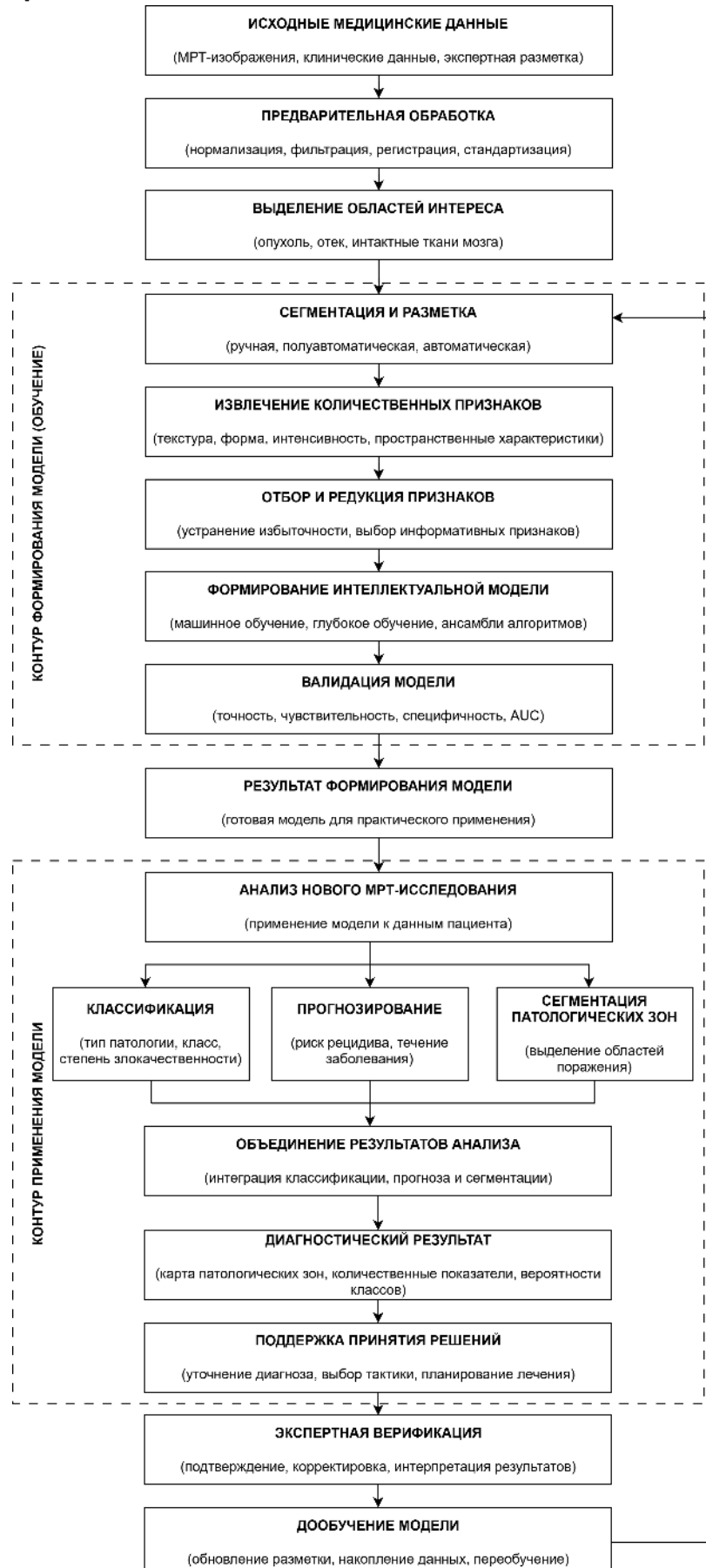


Рисунок 1 - Концептуальная модель интеллектуального анализа МРТ-изображений

Таким образом, современные подходы к обработке медицинских изображений ориентированы как на выявление патологического очага, так и на решение более сложных задач, связанных с классификацией, прогнозированием и формированием интерпретируемого диагностического результата. Для систематизации этих процессов целесообразно рассматривать интеллектуальный анализ МРТ-изображений не как совокупность отдельных алгоритмов, а как целостную информационно-аналитическую систему.

На рисунке 1 представлена концептуальная модель интеллектуального анализа МРТ-изображений головного мозга.

В верхней части схемы отражён общий поток подготовки данных. Исходными данными являются МРТ-изображения, клиническая информация и экспертная разметка. Затем выполняется предварительная обработка, включающая нормализацию, фильтрацию, регистрацию и стандартизацию изображений. После этого выделяются области интереса, соответствующие опухолям, перифокальному отёку и интактным тканям мозга. Данные этапы формируют основу для последующего построения аналитической модели.

Далее в схеме выделен контур формирования модели. Он включает сегментацию и разметку изображений, извлечение количественных признаков, их отбор и редукцию, формирование интеллектуальной модели и её валидацию. Такое представление показывает, что обучение системы не сводится только к запуску алгоритма машинного обучения, а требует последовательной подготовки данных, формирования информативного признакового пространства и оценки качества полученного решения. Результатом данного контура является аналитическая модель, подготовленная для практического применения.

Рассмотрим подробнее контур применения модели. Сформированная модель используется для анализа нового МРТ-исследования пациента, после чего обработка разветвляется на три направления: классификацию патологии, прогнозирование течения заболевания и сегментацию патологических зон. Полученные результаты затем объединяются в единый диагностический результат, содержащий карту патологических зон, количественные показатели и вероятностные оценки. На этой основе реализуется поддержка принятия врачебных решений, необходимая для уточнения диагноза, выбора тактики и планирования лечения.

Отдельное значение в предложенной модели имеет блок экспертной верификации. После получения результата специалист подтверждает, уточняет или корректирует выводы системы. Эти данные используются для дообучения модели, что обеспечивает наличие обратной связи и делает систему адаптивной. За счёт этого интеллектуальный анализ изображений рассматривается как развивающийся процесс, в котором качество решений может повышаться по мере накопления новых клинических данных и уточнения разметки.

головного мозга

Таким образом, предложенная концептуальная модель позволяет формализовать основные этапы интеллектуального анализа МРТ-изображений головного мозга и показать взаимосвязь между подготовкой данных, формированием модели, её применением и последующей адаптацией. Практическая значимость такого подхода заключается в возможности перехода от изолированного использования отдельных методов обработки изображений к построению целостной информационно-аналитической системы, ориентированной на повышение точности диагностики и эффективности поддержки врачебных решений.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Тимохина О.А., Баранов В.А., Сафронов М.И. Канал измерения скорости распространения пульсовой волны персонализированной информационно-измерительной системы для телемедицинского амбулаторного мониторинга // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2021. – Т. 2. – С. 75-77.
2. Марокина А.М., Раевский Г.П. Портативный блок регистрации ЭКГ // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2021. – Т. 1. – С. 309-311.
3. Захарова, Н. Е. Современные стандарты МРТ-диагностики опухолевых поражений головного мозга / Н. Е. Захарова, И. Н. Пронин, А. И. Баталов, Е. И. Шульц, А. Н. Тюрина, А. А. Баев, Л. М. Фадеева // Вопросы нейрохирургии имени Н. Н. Бурденко. – 2020. – Т. 84, № 3. – С. 102-112. – DOI 10.17116/neiro202084031102.
4. Танташева, А. М. Функциональная магнитно-резонансная томография в диагностике когнитивных нарушений / А. М. Танташева, С. В. Воробьев, С. Н. Янишевский, А. Ю. Ефимцев, А. В. Соколов, И. К. Терновых, М. С. Антушева, К. С. Сейтказина, К. М. Шубина // Consilium Medicum. – 2025. – Т. 27, № 11. – С. 652-658. – DOI 10.26442/20751753.2025.11.203432.
5. Брюхов, В. В. МРТ в диагностике рассеянного склероза / В. В. Брюхов, С. Н. Куликова, И. А. Кротенкова, М. В. Кротенкова, А. В. Переседова // Медицинская визуализация. – 2014. – № 2. – С. 10-21.
6. Крылов, В. В. Компьютерная томография и магнитно-резонансная томография в диагностике аневризм головного мозга / В. В. Крылов, Е. В. Григорьева // Нейрохирургия. – 2012. – № 3. – С. 9-17.
7. Лясковик, А. А. МРТ-диагностика болезни Альцгеймера / А. А. Лясковик, Р. Н. Коновалов, Е. Ю. Федотова, М. В. Кротенкова // Нервные болезни. – 2023. – № 3. – С. 14-19.

8. Zhao, Y. Effect of clinical decision support systems on clinical outcome for acute kidney injury: a systematic review and meta-analysis / Y. Zhao, X. Zheng, J. Wang [et al.] // BMC Nephrology. – 2021. – Vol. 22, No. 1. – Art. 271. – DOI 10.1186/s12882-021-02459-y.
9. Long, H. MRI radiomic features of peritumoral edema may predict the recurrence sites of glioblastoma multiforme / H. Long, P. Zhang, Y. Bi [et al.] // Frontiers in Oncology. – 2023. – Vol. 12. – Art. 1042498. – DOI 10.3389/fonc.2022.1042498.
10. Khorasani, A. Glioma grading by integrating radiomic features from peritumoral edema in fused MRI images and automated machine learning / A. Khorasani // Journal of Imaging. – 2025. – Vol. 11, No. 10. – Art. 336. – DOI 10.3390/jimaging11100336.
11. Gates, E. D. H. Imaging-based algorithm for the local grading of glioma / E. D. H. Gates, J. S. Lin, J. S. Weinberg [et al.] // AJNR American Journal of Neuroradiology. – 2020. – Vol. 41, No. 3. – P. 400–407. – DOI 10.3174/ajnr.A6405.
12. Sun, X. Glioma subtype prediction based on radiomics of tumor and peritumoral edema under automatic segmentation / X. Sun, S. Li, C. Ma [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Art. 27471. – DOI 10.1038/s41598-024-79344-9.

УДК 66:023

**Затравкина<sup>1</sup> Е.И., Ямпурин<sup>2</sup> Н.П.**<sup>1,2</sup> Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, Арзамас, Россия<sup>1,2</sup> kitres@apinntu.ru**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ОЗОНАТОРОВ**

**Аннотация.** Проведен анализ основных характеристик медицинских озонаторов, определяющих безопасность и надёжность этого вида медицинской техники. Рассмотрены современные конструктивные и технические решения, направленные на повышение стабильности генерации озона, обеспечение точности дозирования озono-кислородной смеси и безопасности ее использования. На примере продукции компании «Медозонс» выделены приоритетные направления усовершенствования озонаторов, включающие использование интеллектуальных систем автоматического контроля и калибровки.

**Ключевые слова:** медицинский озонатор, озонотерапия, надёжность, стабильность, концентрация, системы безопасности

**Zatravkina<sup>1</sup> E.I., Yampurin<sup>2</sup> N.P.**<sup>1,2</sup> Arzamas Polytechnic Institute (branch) of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Arzamas, Russia<sup>1,2</sup> kitres@apinntu.ru**ENSURING THE SAFETY AND RELIABILITY OF MEDICAL OZONE GENERATORS**

**Abstract.** An analysis of the main characteristics of medical ozonators, determining the safety and reliability of this type of medical equipment, has been carried out. Modern design and technical solutions aimed at increasing the stability of ozone generation, ensuring the accuracy of dosing the ozone-oxygen mixture, and the safety of its use are considered. Using the products of the company 'Medozons' as an example, the priority directions for improving ozonators are highlighted, including the use of intelligent systems for automatic control and calibration.

**Keywords:** medical ozonator, ozone therapy, reliability, stability, concentration, safety systems

В современной медицинской практике озонотерапия занимает важное место благодаря выраженным терапевтическим свойствам озона: антибактериальное, противовоспалительное и иммуномодулирующее действия. Основным звеном в проведении озонотерапии является медицинский озонатор — устройство, предназначенное для генерации озона с высокой точностью и стабильностью. Надёжность работы такого оборудования имеет первостепенное значение, поскольку отклонения в концентрации озона или сбой в работе прибора угрожают как безопасности, так и жизни пациента. Из совокупности показателей качества продукции к приоритетным показателям качества медицинских озонаторов можно отнести как надёжность, которая является комплексным ее свойством, включающим безотказность, долговечность, ремонтпригодность, так и безопасность [1].

Одной из важнейших характеристик любого медицинского озонатора является стабильность выходной концентрации озона. Точность поддержания заданной дозы озона определяет надёжность и безопасность всей терапевтической процедуры [2]. Стационарная концентрация озона  $C_{O_3}^{st}$ , измеряемая в мг/м<sup>3</sup>, на выходе генератора озона описывается уравнением баланса [3]:

$$\frac{dC_{O_3}}{dt} = G - k_d \cdot C_{O_3} - \frac{Q}{V} \cdot C_{O_3}, \quad (1)$$

где  $G$  — скорость генерации озона в камере,  $\frac{\text{мг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}$ ;

$k_d$  — константа скорости термического распада озона,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Q$  — объёмный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$V$  — объём камеры,  $\text{м}^3$ .

В установившемся режиме левая часть уравнения (1) обнуляется, откуда получаем:

$$C_{O_3}^{st} = \frac{G \cdot V}{Q + k_d \cdot V}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что для поддержания стабильной и высокой концентрации озона необходимо минимизировать  $k_d$ , например, снижением температуры в зоне разряда, и поддерживать постоянный объёмный расход  $Q$ .

Согласно клиническим рекомендациям, озон должен быть использован в течение первых 10 минут после генерации, так как за это время теряется до 10% начальной дозы [4]. Процесс распада озона в замкнутом объёме, например, в шприце, за время  $t$  описывается экспоненциальным законом:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-k_d t}, \quad (3)$$

где  $C_0$  — начальная концентрация.

Период полураспада для медицинских озоновых смесей при комнатной температуре составляет примерно 20–30 минут, что ограничивает время ее терапевтического использования.

Современные высокоточные системы демонстрируют стабильность концентрации на уровне лучше 1% от заданного значения. Так российские приборы, выпускаемые

компанией «Медозонс», обеспечивают поддержание стабильности концентрации озона на выходе с точностью  $\pm 5\%$  [5-7]. Для достижения такой точности используются системы автоматического контроля, включая автоматическую калибровку в процессе работы. Современные калибровочные системы позволяют достичь стабильности показаний на уровне 2-9% при повторяемости измерений 0,0-4,1%, что подтверждает общую тенденцию развития прецизионных озоновых систем [8].

В современных аппаратах «Медозонс» для повышения точности применяется двойная система фотометрического измерения концентрации озона (в газовой и жидкой фазе), что является его особенностью, гарантирующей точность и безопасность дозозависимой терапии [7]. Данный подход соответствует современным стандартам метрологического обеспечения, когда измерение концентрации озона надо выполнять оптическим методом в ультрафиолетовом диапазоне в соответствии с рекомендациями Международной ассоциации озона (IOA) [8].

Точность дозирования озона обеспечивается комплексом систем: датчиками расхода газа, измерителями концентрации и системами управления. Современные медицинские озонаторы должны быть оснащены чувствительными датчиками, постоянно отслеживающими входное давление и поток кислорода, что позволяет поддерживать выходные параметры с высокой повторяемостью.

Агрессивность озона требует особого внимания к системам безопасности, важными элементами которых являются:

- деструкторы озона для разложения неиспользованного озона до безопасных концентраций;
- системы автоматической блокировки при нарушениях в работе;
- двойные клапанные системы с автоматической компенсацией давления для предотвращения утечек;
- устойчивые к озону материалы и каталитические системы [9].

Отказ аппаратуры может напрямую снизить эффективность лечения и даже нанести вред здоровью пациента, что диктует особые требования к надежности всех узлов озонатора медицинского назначения [10]. Для этого в современных аппаратах озонотерапии реализуется встроенная защита, исключающая ошибочные действия оператора, например, случайное попадание физиологического раствора в газовый тракт, что повышает ремонтпригодность и общую безопасность озонатора.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения надёжности озонаторов медицинского назначения является разработка новых материалов для электродных систем и корпусных элементов. Использование композитных материалов на основе стеклопластика позволяет не только решить проблему коррозии, но и снизить массу устройства при сохранении прочностных характеристик. Изготовление газовых трасс и камер из озоно-стойких материалов (нержавеющая сталь, фторопласты, кварцевое стекло) напрямую увеличивает срок службы озонаторов.

Внедрение интеллектуальных систем автоматического контроля также является одним из ключевых направлений повышения надёжности. Анализ патентов в области озонаторостроения показывает, что применение микроконтроллерного управления и систем самодиагностики существенно снижает риск отказов [11, 12]. Важными элементами повышения надёжности стали удалённая диагностика и обновление программного обеспечения.

В настоящее время в аппаратах озонотерапии «Медозонс» реализована двойная система фотометрического измерения концентрации озона, а также автоматическая калибровка по встроенным алгоритмам. Прибор имеет управление на микропроцессорах и встроенные датчики насыщенности озоном, что обеспечивает автоматический контроль и стабильность выходных параметров.

Ресурс разрядной камеры является прямым показателем долговечности озонатора, в современных приборах его наработка на отказ достигает 8000 часов [7]. Повышение ресурса достигается за счёт:

- оптимизации геометрии разрядного промежутка;
- применения поверхностного разряда на керамическом диэлектрике;
- внедрения систем автоматической компенсации колебаний давления кислорода и напряжения питания [8].

Анализ современных конструкций медицинских озонаторов показывает, что надёжность прибора является интегральной характеристикой, зависящей от множества факторов. Повышение надёжности одного компонента часто влечёт за собой усложнение конструкции и, как следствие, потенциальное снижение надёжности других элементов. Для достижения высокой надёжности прибора в целом необходимо повышать надёжность или минимизировать вклад наиболее ненадёжных элементов и узлов.

Для сложных технических систем, к которым также относятся и современные медицинские озонаторы, ключевым фактором обеспечения общей надёжности является

использование адаптивных алгоритмов оценки безотказности, учитывающих структурную сложность и энтропию системы [13].

Наиболее перспективным представляется комплексный подход к надёжности, когда на конструкторско-технологическом этапе жизненного цикла [1] реализуется:

- выбор коррозионно-стойких материалов;
- резервирование критически важных систем (двойное измерение концентрации) [9];
- внедрение систем непрерывного самоконтроля [14, 8];
- обеспечение ремонтпригодности через модульную конструкцию.

Важным этапом в жизненном цикле озонаторов является процесс эксплуатации, когда анализируются рекламации и заключения потребителя, важно плановое обслуживание медицинских озонаторов, которое должно проводиться раз в три-шесть месяцев.

Реализация указанных направлений позволяет создавать медицинские озонаторы нового поколения с повышенной надёжностью, что расширит возможности безопасного и эффективного применения озонотерапии в клинической практике.

Упомянутые выше аппараты служат удачным примером реализации описанных принципов повышения надежности и безопасности озонаторов. Интеграция двойной системы фотометрического контроля, применение озонобезопасных материалов и продуманная защита от некорректных действий пользователя в совокупности обеспечивают высокую надежность прибора на протяжении всего срока службы. Это наглядно демонстрирует, как целенаправленное совершенствование основных характеристик напрямую повышает надёжность конечного медицинского изделия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямпурин Н.П. Управление качеством электронных средств: учеб. пособие / Н.П. Ямпурин Н.П., Р.В. Свердлов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2015. – 115 с.
2. Афанасов М.А. Состояние и перспективы развития озонаторов медицинского назначения / М.А. Афанасов, Е.И. Затравкина // Труды XV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022». – Владимир-Суздаль, 2022. – С. 68-71.
3. Harte J. Consider a spherical cow: a course in environmental problem solving. – Mill Valley, CA: University Science Books, 1988. – xvi, 283 p. – ISBN 093570258X.
4. Sánchez-Martínez G. Practical aspects of ozone therapy: Checking the generated ozone concentration / average lifetime of gas in the syringe // Ozone Therapy Global Journal. – 2013. – Vol. 3, No. 1. – P. 67-73.
5. Медицинский озонатор МЕДОЗОНС БМ [Электронный ресурс] // rosmed.ru. – URL: <https://www.rosmed.ru/scatalog/show/10151/> (дата обращения: 06.04.2026).
6. Установка УОТА-60-01-Медозон [Электронный ресурс] // medozone.ru. – URL: <https://medozone.ru/products/uota/> (дата обращения: 06.04.2026).
7. Характеристики. Медицинский озонатор МЕДОЗОНС БМ-01 [Электронный ресурс] // rosmed.ru. – URL: <https://www.rosmed.ru/scatalog/features/10152/> (дата обращения: 07.04.2026).
8. Li X. Development of a Portable Ozone Generation System for Calibration of Online Ozone Water Analyzers / X. Li, X. Yin, X. Chen [et al.] // Ozone: Science & Engineering. – 2025. – Vol. 47, Iss. 2. – P. 179-189. – DOI: 10.1080/01919512.2024.2432482.
9. OZONETTE – Sedecal [Electronic resource] // sedecal.com. – URL: <https://www.sedecal.com/products/ozonette/#content> (дата обращения: 10.04.2026).
10. Юдин В.А. Опыт применения структурного метода для оценки надежности робототехнического комплекса медицинского назначения / В.А. Юдин // Труды Международного симпозиума "Надежность и качество". – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2020. – Т. 2. – С. 162-166.
11. Патент № RU 2568703 C2. Российская Федерация, МПК C01B 13/11. Озонатор: № 2014116930/05; заявл. 25.04.2014; опубл. 20.11.2015 / Камардин А.И., Ким С.Н., Симонов А.А., Лисицын В.Г. – 3 с.
12. Патент KZ 10422. Казахстан, МПК C01B 13/11. Озонатор: опубл. 16.10.2006 / Абишев М.А., Бахтаев Ш.А., Кожаспаев Н.К., Боканова А.А. – 3 с.
13. Дорохов А.Н. Централизованный адаптивный алгоритм оценки безотказности сложных технических систем различной энтропии / А.Н. Дорохов, С.П. Прохоров // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 28-33.
14. Medical Ozone Generator ZAMT-80B [Electronic resource] // zamt.com.cn. – URL: <http://www.zamt.com.cn/index.php?m=home&c=View&a=index&aid=841&lang=en> (дата обращения: 10.04.2026).

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ В ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**Аннотация.** Рассматриваются информационные потоки электронной информационно-образовательной среды образовательной организации (ЭИОС) в условиях цифровизации высшего образования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью структурирования данных, циркулирующих между компонентами ЭИОС, и обеспечения их согласованного использования в образовательных, административных и аналитических процессах. Отсутствие формализованного представления об информационных потоках приводит к дублированию данных, их рассогласованию и усложнению интеграции информационных систем. Уточнено понятие информационных потоков ЭИОС как направленного движения данных между компонентами цифровой инфраструктуры, возникающего в процессе взаимодействия пользователей и информационных систем. Выделены источники и получатели данных, а также рассмотрена структура формирования потоков в условиях распределённой архитектуры образовательной среды. Предложена классификация информационных потоков, включающая контингентные и статусные данные, образовательные активности обучающихся, образовательные ресурсы, административно-управленческие, а также аналитические данные и показатели. Классификация учитывает содержание, источники формирования и направления использования. Структура информационных потоков представлена в виде диаграммы потоков данных. Систематизированы типы движения потоков (однаправленные, двунаправленные, многосторонние) и уровни межсистемного взаимодействия (функциональный, информационный, технологический). Показано, что распределённый характер формирования данных обуславливает возникновение проблем, связанных с дублированием информации, отсутствием единого источника достоверной информации и усложнением межсистемной интеграции. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании архитектуры ЭИОС и разработке механизмов управления информационными потоками.

**Ключевые слова:** электронная информационно-образовательная среда, информационные потоки, цифровая инфраструктура, интеграция данных, образовательные системы, архитектура ЭИОС

**Litvinov<sup>1</sup> V.V.**

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>1</sup> litvinov@mirea.ru

## **INFORMATION FLOWS IN THE ELECTRONIC INFORMATION AND EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF AN EDUCATIONAL ORGANIZATION**

**Abstract.** This article examines the information flows of the electronic information and educational environment of an educational organization (EIEO) in the context of the digitalization of higher education. The relevance of this research is due to the need to structure the data that circulates between the components of the EIEO and ensure their consistent use in educational, administrative, and analytical processes. The lack of a formalized representation of information flows leads to data duplication, inconsistencies, and difficulties in integrating information systems. The concept of EIOS information flows has been clarified as a directed movement of data between the components of the digital infrastructure that occurs during the interaction between users and information systems. The sources and recipients of data have been identified, and the structure of data flow formation in a distributed educational environment has been examined. A classification of information flows is proposed, which includes contingent and status data, educational data, student activities, educational resources, administrative and managerial data, as well as analytical data and indicators. The classification takes into account the content, sources of formation, and areas of use. The structure of information flows is presented in the form of a data flow diagram. The types of flow movement (unidirectional, bidirectional, and multidirectional) and the levels of intersystem interaction (functional, informational, and technological) are systematized. It is shown that the distributed nature of data generation causes problems related to information duplication, the lack of a single source of reliable information, and the complexity of intersystem integration. The results obtained can be used in the design of EIS architecture and the development of information flow management mechanisms.

**Keywords:** electronic information and educational environment, information flows, digital infrastructure, data integration, educational systems, EIEA architecture

**Введение.** Цифровая трансформация системы высшего образования сопровождается активным внедрением информационных технологий в образовательную и административную деятельность университетов. В этих условиях формируется электронная информационно-образовательная среда (ЭИОС), представляющая собой совокупность взаимосвязанных цифровых сервисов и информационных систем, обеспечивающих реализацию образовательных и управленческих процессов [1].

Развитие ЭИОС рассматривается в контексте формирования информационно-образовательного пространства и расширения форм информационного взаимодействия между субъектами образовательной деятельности, включая обучающихся, преподавателей и административный персонал [2]. Использование информационно-коммуникационных технологий способствует формированию распределённой цифровой среды, интегрирующей образовательные ресурсы, сервисы и управленческие системы [3].

В процессе функционирования ЭИОС генерируются значительные объёмы данных, фиксирующих образовательную деятельность, административные процессы и взаимодействие пользователей с цифровыми сервисами. Данные передаются между

информационными системами и образуют совокупность информационных потоков, обеспечивающих согласованное функционирование компонентов среды.

Несмотря на активное развитие электронной информационно-образовательной среды, вопросы структурирования и анализа информационных потоков остаются недостаточно проработанными. В существующих исследованиях преобладает анализ функционального состава среды и архитектурных решений интеграции информационных систем; при этом структура и типология потоков данных, циркулирующих между компонентами ЭИОС, описываются ограниченно и не формируют целостного представления. Отсутствие формализованной модели информационных потоков и регламентов их обработки приводит к дублированию данных, рассогласованию их состояний и усложнению интеграции информационных систем. Недостаточная формализация затрудняет определение источников данных, правил их актуализации и механизмов синхронизации, что проявляется в избыточных обменах и несогласованности информации между подсистемами.

В ряде работ отмечается, что функционирование электронной информационно-образовательной среды сопровождается формированием распределённых потоков данных, однако такие потоки, как правило, не рассматриваются как самостоятельный объект анализа и управления [4], что в свою очередь, ограничивает возможности системного описания межсистемного взаимодействия и разработки решений по организации обмена данными.

В этих условиях возникает необходимость систематизации информационных потоков ЭИОС и анализа их структуры, направлений движения и роли в обеспечении функционирования цифровой образовательной инфраструктуры.

Объектом исследования является электронная информационно-образовательная среда образовательной организации. Предметом исследования выступают информационные потоки, формирующиеся в процессе взаимодействия информационных систем ЭИОС. Цель исследования заключается в систематизации информационных потоков электронной информационно-образовательной среды и выявлении особенностей их формирования и движения между информационными системами.

Функционирование ЭИОС сопровождается непрерывным обменом данными между её компонентами, обеспечивающим реализацию образовательных, административных и аналитических процессов. В рамках ЭИОС данные передаются между различными информационными системами и образуют совокупность взаимосвязанных информационных потоков.

В данном исследовании под информационными потоками электронной информационно-образовательной среды понимается направленное движение данных между компонентами цифровой инфраструктуры образовательной организации, возникающее в процессе взаимодействия пользователей и информационных систем. Такое понимание соответствует подходам к организации обмена сообщениями в распределённых информационных системах [5].

Источниками информационных потоков выступают информационные системы и цифровые сервисы, в которых происходит формирование или изменение данных, включая системы управления обучением, системы учёта контингента обучающихся, административные системы и сервисы взаимодействия пользователей. Получателями являются системы, использующие данные для выполнения образовательных, управленческих и аналитических функций. При этом одна и та же информационная система может одновременно выступать источником и получателем данных, участвуя в межсистемном обмене.

Формирование информационных потоков обусловлено действиями пользователей (обучающихся, преподавателей, административного персонала), а также автоматизированными процессами обработки данных. Каждое изменение состояния информационного объекта, включая обновление статуса обучающегося, фиксацию результатов обучения или изменение параметров образовательной программы, инициирует передачу данных между системами, вовлечёнными в соответствующий процесс.

С архитектурной точки зрения информационные потоки отражают структуру межсистемных взаимодействий и позволяют рассматривать электронную информационно-образовательную среду как распределённую систему взаимосвязанных сервисов, в которой данные формируются в одних компонентах и используются в других [6]. Это обуславливает необходимость организации устойчивых механизмов передачи и согласования данных. Необходимость учёта межсистемного взаимодействия и обмена данными подчёркивается в работах, посвящённых проектированию информационных систем образовательных организаций, где отмечается важность интеграции разнородных подсистем и обеспечения их совместного функционирования [7]. Таким образом, информационные потоки выступают не только следствием функционирования ЭИОС, но и фактором, определяющим её архитектурные характеристики.



Информационные потоки электронной информационно-образовательной среды формируются в результате взаимодействия участников образовательного процесса и информационных систем, обеспечивающих реализацию образовательной и управленческой деятельности. Их структура определяется составом источников и получателей данных, а также характером их взаимодействия.

Ключевыми участниками формирования информационных потоков являются пользователи ЭИОС, включая обучающихся, преподавателей и административный персонал, которые в процессе работы с цифровыми сервисами инициируют создание и изменение информационных объектов, связанных с образовательной деятельностью, управлением учебным процессом и административными процедурами. Данные действия фиксируются в информационных системах и становятся основой для последующего движения данных между компонентами среды.

Наряду с пользователями существенную роль в формировании информационных потоков играют автоматизированные процессы обработки данных, включая синхронизацию информации между системами, формирование отчётности, обновление справочных данных и выполнение регламентных операций. В этих случаях генерация и передача данных осуществляется без непосредственного участия пользователя, что отражает системный характер функционирования ЭИОС.

Источниками данных в электронной информационно-образовательной среде являются информационные системы, в которых осуществляется первичное формирование или обновление информации. К числу таких систем относятся системы управления обучением, системы учёта контингента обучающихся, административные системы и сервисы цифровых образовательных ресурсов. Каждая из них формирует специфические типы данных, отражающие отдельные аспекты деятельности образовательной организации.

Получателями данных выступают информационные системы, использующие данные, сформированные в других компонентах ЭИОС, для реализации образовательных, управленческих и аналитических функций, включая сопровождение образовательного процесса, административной деятельности, формирование отчётности и аналитическую обработку информации. В условиях распределённой цифровой среды одна и та же система может одновременно выступать источником и получателем данных, участвуя в многонаправленной схеме межсистемного взаимодействия.

Таким образом, структура информационных потоков электронной информационно-образовательной среды определяется совокупностью взаимодействующих субъектов и информационных систем, формирующих распределённую сеть обмена данными. Данные, возникающие в рамках отдельных процессов, передаются между системами и используются в различных функциональных контекстах, что приводит к их многократному использованию и формированию устойчивых межсистемных связей. Выделение источников и получателей данных, а также анализ их роли в формировании информационных потоков создаёт основу для последующей систематизации типов данных, циркулирующих в ЭИОС.

Анализ структуры данных и межсистемного взаимодействия позволяет выделить основные типы информационных потоков, различающиеся по содержанию, источникам формирования и функциональному назначению. Классификация информационных потоков основана на характере формируемых данных и их роли в обеспечении образовательных, административных и аналитических процессов. В отличие от существующих подходов, в которых информационные потоки рассматриваются фрагментарно в контексте отдельных информационных систем или процессов, в рамках данного исследования предложена классификация информационных потоков ЭИОС, учитывающая их содержание, источники формирования и направления использования в цифровой образовательной среде. Выделенные типы информационных потоков представлены в Таблице 1.

Представленная в Таблице 1 классификация отражает основные категории данных, циркулирующих в электронной информационно-образовательной среде, и позволяет соотнести их с источниками формирования и направлениями использования. Контингентные и статусные данные (П1) формируют основу идентификации участников образовательного процесса и используются в различных компонентах ЭИОС для обеспечения доступа к цифровым сервисам и ресурсам. Образовательные данные и данные активности обучающихся (П2) характеризуют процесс реализации образовательных программ и включают как структурные параметры учебного процесса, так и результаты образовательной деятельности.

Данные образовательных ресурсов (П3) обеспечивают информационное наполнение образовательной среды и используются преимущественно в системах управления обучением и аналитических сервисах. Административно-управленческие данные (П4) отражают процессы организационного управления и используются для сопровождения кадровых, документарных и финансовых процедур. Аналитические данные и показатели (П5) формируются на основе агрегирования информации из различных источников

и предназначены для мониторинга образовательной деятельности и поддержки управленческих решений.

Информационные потоки

Таблица 1

| Обозначение | Тип потока                                 | Содержание данных                                                                                       | Основные источники                                                         | Основные получатели                                                     |
|-------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| П1          | Контингентные и статусные данные           | Сведения об обучающихся, их статусе, принадлежности к группам и образовательным программам              | Системы учёта контингента                                                  | Системы управления обучением, сервисы доступа, административные системы |
| П2          | Образовательные данные и данные активности | Учебные планы, дисциплины, расписание, результаты обучения, данные активности обучающихся               | Системы управления обучением, системы управления образовательным процессом | Системы учёта, аналитические сервисы, административные системы          |
| П3          | Данные образовательных ресурсов            | Электронные учебные материалы, цифровые образовательные ресурсы, контент                                | Электронные библиотечные системы, контент-платформы                        | Системы управления обучением, аналитические системы                     |
| П4          | Административно-управленческие данные      | Кадровые данные, приказы, организационные документы, финансовая информация                              | Административные системы, СЭД                                              | Управленческие и аналитические системы                                  |
| П5          | Аналитические данные и показатели          | Агрегированные показатели, результаты анализа образовательных процессов, метрики функционирования среды | Аналитические системы, BI-сервисы                                          | Административные системы, системы управления образовательным процессом  |

Источник: составлено автором

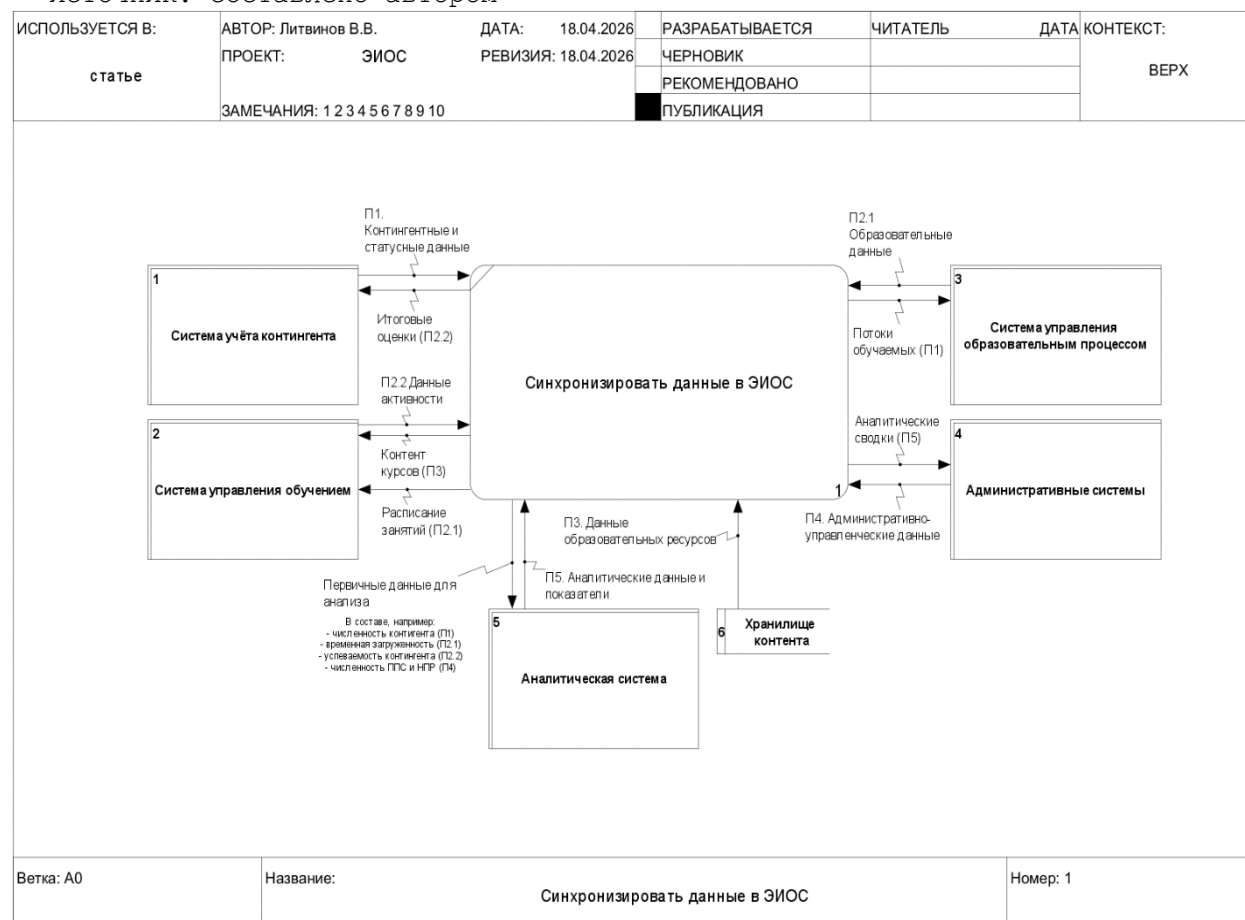


Рисунок 1 – Диаграмма потоков данных в процессе синхронизации данных в электронной информационно-образовательной среде

Таким образом, выделенные типы информационных потоков охватывают основные аспекты функционирования электронной информационно-образовательной среды и отражают взаимосвязь образовательных, административных и аналитических процессов. При этом классификация описывает содержание и назначение данных, тогда как для анализа их движения и роли в структуре цифровой инфраструктуры требуется рассмотрение их в контексте межсистемного взаимодействия.

Структура информационных потоков ЭИОС и их роль в обеспечении функционирования цифровой инфраструктуры могут быть представлены в виде диаграммы потоков данных, представленной на Рисунке 1, отражающей относительно процесса синхронизации данных в ЭИОС направления потоков данных внешних систем и хранилища данных.

Представленная на Рисунке 1 диаграмма отражает потоки данных, которые связывают системы электронной информационно-образовательной среды в процессе синхронизации данных посредством информационных потоков. В числе информационных систем как внешних сущностей выделены система учёта контингента (1), система управления обучением (2), система управления образовательным процессом (3), административные системы (4), аналитическая система (5) и в качестве хранилища данных выделено хранилище контента (6), в обобщённом виде представляющее объектное хранилище файлов, используемых в разных информационных системах ЭИОС. Потоки данных, движущиеся между системами, определены и подписаны в соответствии с Таблицей 1: контингентные и статусные данные (П1), образовательные данные (П2.1) и данные активности обучающихся (П2.2), данные образовательных ресурсов (П3), а также административно-управленческие данные (П4). Они исходят из информационных систем, их продуцирующих, и поступают в общий процесс, обобщённо описывающий функционал интеграционной шины «Синхронизировать данные ЭИОС».

Результатом выполнения процесса являются потоки данных, преобразованные и редуцированные к перечню данных, необходимых конкретной информационной системе в рамках её подписки на получение информации в интеграционной системе. Таким образом, например, аналитическая система получает преобразованные до объёма её подписки данные из потоков П1, П2.1, П2.2 и П4 и в результате своего функционирования формирует поток аналитических данных и показателей (П5), используемый также в преобразованном виде в административных системах для мониторинга образовательной деятельности и поддержки управленческих решений.

Представленная диаграмма позволяет рассматривать информационные потоки как элемент функциональной структуры электронной информационно-образовательной среды, обеспечивающий согласованное взаимодействие её компонентов и преобразование данных в управленчески значимую информацию.

Предложенная классификация отражает основные категории данных, циркулирующих в электронной информационно-образовательной среде, и позволяет структурировать межсистемные взаимодействия в зависимости от их функционального назначения, создавая основу для анализа направлений движения данных и особенностей взаимодействия информационных систем.

Рассмотренные типы информационных потоков позволяют описать состав и содержание данных, циркулирующих в электронной информационно-образовательной среде, однако для анализа её функционирования необходимо учитывать не только характеристики данных, но и особенности их движения между информационными системами. В условиях распределённой архитектуры ЭИОС информационные потоки реализуются в различных направлениях и режимах взаимодействия, формируя сложную структуру межсистемных связей.

Типы движения данных и уровни межсистемного взаимодействия могут быть представлены в виде обобщённой схемы, представленной на Рисунке 2, отражающей взаимосвязь направлений обмена данными и уровней функционирования электронной информационно-образовательной среды.

Представленная на Рисунке 2 схема отражает основные типы движения данных в электронной информационно-образовательной среде и соответствующие им уровни межсистемного взаимодействия. Однонаправленные потоки характеризуются передачей данных от системы-источника к системе-получателю без обратной передачи нормативно-справочной информации и используются преимущественно для распространения информации в объёме подписки системы, например, общих справочников, а также контингентных данных. Двухнаправленные потоки предполагают взаимный обмен данными между информационными системами, при котором каждая из них выступает одновременно источником и получателем информации; такой тип взаимодействия характерен для процессов, связанных с реализацией образовательной деятельности. Многосторонние потоки реализуются при взаимодействии одной системы с несколькими компонентами среды, в том числе двухнаправленном, либо при агрегировании

данных из различных источников, что типично для аналитических сервисов и систем мониторинга.



Рисунок 2 – Типы информационных потоков и уровни взаимодействия в электронной информационно-образовательной среде

Рассмотренные типы потоков реализуются на различных уровнях межсистемного взаимодействия. На функциональном уровне определяется роль информационных систем в реализации образовательных и управленческих процессов и их участие в формировании потоков данных. На информационном уровне осуществляется непосредственный обмен данными между системами, обеспечивающий формирование и циркуляцию информационных потоков. На технологическом уровне обеспечивается техническая реализация взаимодействия за счёт использования программных средств интеграции, протоколов обмена и механизмов передачи данных.

Таким образом, схема демонстрирует взаимосвязь направлений движения данных и уровней функционирования электронной информационно-образовательной среды, позволяя рассматривать межсистемное взаимодействие как многоуровневую структуру, объединяющую процессы, данные и средства их реализации.

Совокупное рассмотрение направлений движения данных и уровней взаимодействия позволяет уточнить представление о структуре информационных потоков электронной информационно-образовательной среды и выявить особенности межсистемного взаимодействия, определяющие её архитектурные характеристики. Информационные потоки при этом выступают связующим элементом, обеспечивающим интеграцию отдельных компонентов цифровой инфраструктуры в единую систему.

Вместе с тем распределённый характер формирования и использования данных в электронной информационно-образовательной среде обуславливает ряд проблем, связанных с организацией информационного взаимодействия. Одной из ключевых является дублирование данных, возникающее вследствие их хранения и обработки в различных информационных системах. Наличие нескольких источников одних и тех же данных приводит к рассогласованию информации, используемой в различных компонентах ЭИОС, и снижает достоверность формируемых показателей.

Существенным ограничением является отсутствие единого источника достоверных данных, что затрудняет обеспечение их согласованности и актуальности при межсистемном обмене. В условиях множественности информационных потоков и автономности отдельных систем усложняется контроль целостности данных и их синхронизация. Кроме того, значительное количество межсистемных взаимодействий приводит к усложнению интеграции информационных систем, увеличению связности компонентов среды и росту трудоёмкости сопровождения цифровой инфраструктуры.

Указанные проблемы обусловлены отсутствием формализованного описания структуры информационных потоков и их взаимосвязей, что затрудняет управление данными на уровне всей электронной информационно-образовательной среды. Это, в свою очередь, определяет необходимость разработки подходов к организации согласованного обмена данными и управления информационными потоками, а также задаёт направление дальнейших исследований в области архитектуры цифровых образовательных систем.

**Заключение.** Проведённый анализ показал, что электронная информационно-образовательная среда представляет собой распределённую систему взаимосвязанных информационных сервисов, функционирование которой обеспечивается совокупностью информационных потоков. В работе уточнено понятие информационных потоков ЭИОС и показано, что они выступают не только следствием функционирования цифровой образовательной среды, но и структурообразующим элементом её архитектуры.

В результате систематизации выделены основные типы информационных потоков, различающиеся по содержанию, источникам формирования и функциональному

назначению. Предложенная классификация позволяет структурировать данные, циркулирующие между компонентами ЭИОС, и служит основой для анализа межсистемного взаимодействия. Дополнительно рассмотрены направления движения данных и уровни взаимодействия информационных систем, что позволило уточнить архитектурные особенности функционирования электронной информационно-образовательной среды.

Установлено, что распределённый характер формирования и использования данных приводит к возникновению проблем, связанных с дублированием информации, её несогласованием, отсутствием единого источника достоверных данных и усложнением интеграции информационных систем. Указанные ограничения снижают эффективность использования цифровой образовательной инфраструктуры и затрудняют реализацию аналитических и управленческих задач.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании архитектуры ЭИОС, а также при разработке решений, направленных на организацию согласованного обмена данными и управление информационными потоками. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку формализованных моделей интеграции информационных систем и механизмов управления информационными потоками, обеспечивающих целостность и согласованность данных в электронной информационно-образовательной среде.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Литвинов В. В. Архитектура интеграционной системы в электронной информационно образовательной среде. Экономика и качество систем связи. 2026; (1):160–174.
2. Роберт, И. В. Развитие информатизации образования в эпоху цифровых информационных технологий / И. В. Роберт // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2019. – Т. 2. – С. 151-158. – EDN ENTPTV.
3. Вяткина, И. В. Возможности использования инновационных технологий в учебном процессе университета / И. В. Вяткина, С. В. Вьюгина // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2018. – Т. 1. – С. 274-277. – EDN YAFIFV.
4. Литвинов В. В. Формирование цифрового двойника электронной информационно-образовательной среды на основе интеграционной шины данных / Литвинов В. В. // Современные стратегии и цифровые трансформации устойчивого развития общества, образования и науки : Сборник материалов XXXI Международной научно-практической конференции, Москва, 11 марта 2026 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2026. – С. 230-235. – DOI 10.26118/1356.2026.93.18.032
5. Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions / G. Hohpe, B. Woolf. Boston: Addison-Wesley, 2004. 735 p.
6. Distributed Systems: Principles and Paradigms / A. S. Tanenbaum, M. van Steen. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. 686 p.
7. Савинов, К. Н. Анализ требований к проектированию систем контроля и управления доступом для образовательных организаций / К. Н. Савинов, Д. А. Данилин, В. А. Трясучкин // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2019. – Т.2. – С. 308-310. – EDN ACHURU

## **ИСТОРИЯ СОКРЫТИЯ ТЕКСТА В КАРТИНАХ И СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ**

**Аннотация.** Рассматривается историческая эволюция методов сокрытия текстовой информации в произведениях изобразительного искусства от античных приёмов до эпохи Возрождения и раннего Нового времени. Проведён анализ перехода от аналоговых техник (невидимые чернила, анаморфозы, символическая криптография) к цифровой стеганографии. Описаны основные современные методы внедрения данных в растровые изображения, среди которых выделяется метод наименее значащих битов. В практической части представлена полноценная реализация программы на языке Python для сокрытия и извлечения текста в/из изображений в формате PNG с использованием библиотеки Pillow. Результаты демонстрируют доступность стеганографических инструментов и подчёркивают необходимость критического отношения к вопросам информационной безопасности и этики их применения.

**Ключевые слова:** стеганография, история искусства, сокрытие информации, LSB, цифровые изображения, Python, Pillow, анаморфоза, невидимые чернила

**Kochegarov<sup>1</sup> A. I.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> kpra@mail.ru

## **THE HISTORY OF HIDING TEXT IN PAINTINGS AND METHODS OF IMPLEMENTATION**

**Abstract.** This paper examines the historical evolution of methods for concealing textual information in works of art, from ancient techniques to the Renaissance and early modern periods. It analyzes the transition from analog techniques (invisible ink, anamorphosis, symbolic cryptography) to digital steganography. The main modern methods for embedding data in raster images are described, including the least significant bit (LSB) method. The practical section presents a full-fledged Python implementation of a program for concealing and extracting text from and within PNG images using the Pillow library. The results demonstrate the accessibility of steganographic tools and emphasize the need for a critical approach to information security and the ethics of their application.

**Keywords:** steganography, art history, information hiding, LSB, digital images, Python, Pillow, anamorphosis, invisible ink

### **Введение**

Стеганография (от греч. *στεγανός* — «скрытый» и *γράφω* — «пишу») — наука о методах сокрытия факта передачи информации, в отличие от криптографии, скрывающей её содержание. Исторически стеганография развивалась параллельно с изобразительным искусством: художники, шпионы, учёные и религиозные деятели веками прятали послания в картинах, гравюрах и манускриптах. С появлением цифровой эпохи аналоговые приёмы уступили место алгоритмическим, однако логическая преемственность осталась неизменной. Цель данной статьи — проследить историческую линию сокрытия текста в визуальных объектах, описать современные методы цифровой реализации и предоставить рабочий программный код для внедрения и извлечения скрытого текста в растровых изображениях.

### **1. Исторические аспекты сокрытия текста в живописи**

#### **1.1. Античность и Средневековье**

Первые задокументированные случаи стеганографии относятся к V веку до н. э. Геродот описывает случай, когда гонец сбрил волосы, нанёс послание на кожу головы, дождался отрастания волос и передал его адресату. В средневековых манускриптах применялись микрографические техники: текст размещался внутри инициалов или орнаментов, становясь читаемым только при увеличении. В религиозной живописи скрытые послания часто кодировались через иконографические символы (цветы, животные, жесты), понятные лишь узкому кругу образованных зрителей.

#### **1.2. Эпоха Возрождения и барокко**

В XV–XVII веках стеганография в искусстве достигла расцвета. Художники использовали:

Анаморфозы — искажённые проекции, восстанавливаемые при взгляде под определённым углом или через цилиндрическое зеркало (например, «Послы» Г. Хольбейна Младшего, 1533 г., где скрыт череп).

Невидимые чернила — органические растворы (лимонный сок, молоко, железотаниновые составы), проявляемые нагревом или химическими реагентами.

Символическую криптографию — размещение букв в узорах тканей, складках одежд, архитектурных элементах. В картинах Леонардо да Винчи, Сандро Боттичелли и Альбрехта Дюрера исследователи неоднократно находили скрытые монограммы, даты и тексты, встроенные в перспективные линии или растительные орнаменты.

#### **1.3. Новое время и переход к механическим методам**

В XVIII–XIX веках развитие химии и оптики позволило создавать более надёжные невидимые носители. Появились решётки Кардано, шифровальные диски и первые

эксперименты с микрофотографией. К началу XX века стеганография стала инструментом разведки и дипломатии, однако в живописи уступила место концептуальным и политическим аллюзиям.

## 2. Современные методы цифровой стеганографии в изображениях

С оцифровкой визуальных данных стеганография перешла из области ручного труда в область алгоритмов. Основные подходы делятся на две категории:

### 2.1. Пространственные методы (Spatial Domain)

Наиболее распространённый — метод наименее значащих битов (LSB). Каждый пиксель растрового изображения кодируется значениями цветовых каналов (обычно 8 бит на канал). Изменение младшего бита одного или нескольких каналов изменяет цвет незаметно для человеческого глаза, но позволяет внедрить бинарные данные. Преимущества: простота, высокая ёмкость. Недостатки: уязвимость к сжатию, фильтрам, стеганализу.

### 2.2. Частотные методы (Frequency Domain)

Данные внедряются в коэффициенты преобразования Фурье (FFT), дискретного косинусного преобразования (DCT) или вейвлет-преобразования (DWT). Такие методы устойчивы к сжатию JPEG, масштабированию и шумам, но требуют большей вычислительной мощности и сложны в реализации.

### 2.3. Метаданные и структурные методы

Информация скрывается в EXIF, ICC-профилях, комментариях PNG или в порядке пикселей. Легко реализуется, но часто удаляется социальными сетями и конвертерами.

Для учебных и практических целей наиболее наглядным остаётся LSB в无损-форматах (PNG, BMP, TIFF). Ниже приведена полная реализация на Python.

## 3. Практическая реализация: программа на Python

### 3.1. Алгоритм LSB-стеганографии

Преобразовать текст в бинарную строку (UTF-8 → bytes → bits).

Добавить префикс длины сообщения (32 бита) для однозначного извлечения.

Последовательно заменять младшие биты выбранного цветового канала (например, красного) на биты сообщения.

Сохранить результат в PNG (без потерь).

Для извлечения: прочитать 32 бита → определить длину → извлечь указанное количество бит декодировать в текст.

### 3.2. Исходный код

```
import sys
import os
from PIL import Image
import numpy as np
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog, messagebox, ttk

def text_to_bits(text: str) -> list[int]:
    """Преобразует строку в список битов (0/1)"""
    return [int(bit) for byte in text.encode('utf-8') for bit in format(byte, '08b')]

def bits_to_text(bits: list[int]) -> str:
    """Преобразует список битов обратно в строку UTF-8"""
    bytes_list = [int(''.join(map(str, bits[i:i+8])), 2) for i in range(0, len(bits), 8)]
    return bytes(bytes_list).decode('utf-8', errors='ignore')

def encode_lsb(image_path: str, text: str, output_path: str) -> str:
    """Скрывает текст в изображении методом LSB"""
    img = Image.open(image_path).convert('RGB')
    pixels = np.array(img)

    bits = text_to_bits(text)
    length_bits = [int(b) for b in format(len(bits), '032b')]
    full_bits = length_bits + bits

    if len(full_bits) > pixels.size:
        raise ValueError("Сообщение слишком длинное для данного изображения.")

    flat_pixels = pixels.ravel()
    for i, bit in enumerate(full_bits):
        # Исправлено: используем 254 вместо ~1
        flat_pixels[i] = (flat_pixels[i] & 254) | bit

    modified_img = Image.fromarray(flat_pixels.reshape(pixels.shape), 'RGB')
```

```

modified_img.save(output_path, format='PNG')
return f"✅ Текст успешно скрыт в {output_path}"

def decode_lsb(image_path: str) -> str:
    """Извлекает скрытый текст из изображения"""
    img = Image.open(image_path).convert('RGB')
    pixels = np.array(img).ravel()

    length_bits = [(pixels[i] & 1) for i in range(32)]
    msg_length = int(''.join(map(str, length_bits)), 2)

    if msg_length == 0 or msg_length > len(pixels) - 32:
        raise ValueError("В изображении не найдено корректного скрытого сообщения.")

    msg_bits = [(pixels[32 + i] & 1) for i in range(msg_length)]
    return bits_to_text(msg_bits)

# ===== GUI ИНТЕРФЕЙС =====
class SteganographyApp:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("LSB Стеганография | Скрытие текста в изображениях")
        self.root.geometry("520x450")
        self.root.resizable(False, False)

        self.input_path = tk.StringVar()
        self.output_path = tk.StringVar()
        self.status_var = tk.StringVar(value="🟢 Готово к работе")

        style = ttk.Style()
        style.configure("TButton", font=("Segoe UI", 10))

        frame = ttk.Frame(root, padding=15)
        frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

        # Входное изображение
        ttk.Label(frame, text="📁 Входное изображение:").grid(row=0, column=0,
sticky=tk.W, pady=5)
        ttk.Entry(frame, textvariable=self.input_path, width=42,
state="readonly").grid(row=0, column=1, pady=5)
        ttk.Button(frame, text="Обзор", command=self.browse_input).grid(row=0, col-
umn=2, padx=5)

        # Выходное изображение
        ttk.Label(frame, text="📁 Выходное изображение:").grid(row=1, column=0,
sticky=tk.W, pady=5)
        ttk.Entry(frame, textvariable=self.output_path, width=42).grid(row=1, col-
umn=1, pady=5)
        ttk.Button(frame, text="Обзор", command=self.browse_output).grid(row=1, col-
umn=2, padx=5)

        # Текст
        ttk.Label(frame, text="✍ Текст для сокрытия:").grid(row=2, column=0,
sticky=tk.NW, pady=5)
        self.text_box = tk.Text(frame, height=5, width=45, font=("Consolas", 10))
        self.text_box.grid(row=2, column=1, columnspan=2, pady=5)

        # Кнопки
        btn_frame = ttk.Frame(frame)
        btn_frame.grid(row=3, column=0, columnspan=3, pady=15)
        ttk.Button(btn_frame, text="🔒 Зашифровать", command=self.encode,
width=15).pack(side=tk.LEFT, padx=10)
        ttk.Button(btn_frame, text="🔓 Расшифровать", command=self.decode,
width=15).pack(side=tk.LEFT, padx=10)

        # Статус
        ttk.Label(frame, textvariable=self.status_var, foreground="blue",
wraplength=480, justify=tk.LEFT).grid(row=4, column=0, columnspan=3, pady=5,
sticky=tk.W)

    def browse_input(self):

```



```

path = filedialog.askopenfilename(filetypes=[("Images", "*.png *.bmp
*.tiff")])
if path:
    self.input_path.set(path)
    # Автозаполнение пути вывода
    base, ext = os.path.splitext(path)
    self.output_path.set(f"{base}_stego.png")

def browse_output(self):
    path = filedialog.asksaveasfilename(defaultextension=".png", file-
types=[("PNG Image", "*.png")])
    if path:
        self.output_path.set(path)

def encode(self):
    try:
        inp = self.input_path.get()
        out = self.output_path.get()
        text = self.text_box.get("1.0", tk.END).strip()

        if not inp or not out or not text:
            messagebox.showwarning("⚠ Внимание", "Заполните все поля для шифро-
вания.")

        return

        self.status_var.set("⌚ Шифрование...")
        self.root.update()

        msg = encode_lsb(inp, text, out)
        self.status_var.set(msg)
        messagebox.showinfo("✅ Успех", msg)

    except Exception as e:
        self.status_var.set(f"❌ Ошибка: {e}")
        messagebox.showerror("❌ Ошибка", str(e))

def decode(self):
    try:
        inp = self.input_path.get()
        if not inp:
            messagebox.showwarning("⚠ Внимание", "Выберите изображение для рас-
шифрования.")

        return

        self.status_var.set("⌚ Расшифрование...")
        self.root.update()

        msg = decode_lsb(inp)
        self.status_var.set("✅ Текст успешно извлечён")
        messagebox.showinfo("📄 Извлечённый текст", msg)
        self.text_box.delete("1.0", tk.END)
        self.text_box.insert(tk.END, msg)

    except Exception as e:
        self.status_var.set(f"❌ Ошибка: {e}")
        messagebox.showerror("❌ Ошибка", str(e))

if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = SteganographyApp(root)
    root.mainloop()

```

### 3.3. Требования и запуск

Установите зависимости: *pip install pillow numpy*

tkinter входит в стандартную библиотеку Python (Windows/macOS). На Linux может потребоваться *sudo apt install python3-tk*.

Используйте PNG или BMP (JPEG сжимает данные с потерями и разрушит LSB)

Убедитесь, что изображение достаточно велико: минимальный размер  $\approx$  (длина\_текста\_в\_байтах \* 8 + 32) / 3 пикселей

Запустите скрипт: `python stego_gui.py`. Откроется графическое окно с полями выбора файлов, ввода текста и кнопками кодирования/декодирования.

Для повышения устойчивости можно распределить биты по всем трём каналам (R, G, B) или применить псевдослучайное перемешивание позиций пикселей.

#### Заключение

Скрытие текста в картинах прошло путь от химических экспериментов и оптических иллюзий до математически строгих алгоритмов. Исторические методы отражали ограничения своей эпохи, но сохраняли общую цель: передать информацию, минуя посторонние глаза. Современная цифровая стеганография, в частности LSB-метод, демонстрирует, как простые битовые операции позволяют реализовать эту задачу с минимальными вычислительными затратами. Тем не менее, такие методы уязвимы к стеганализу и не подходят для защиты критически важных данных без дополнительных криптографических слоёв. Будущее стеганографии связано с адаптивными частотными методами, нейросетевыми генеративными подходами и стандартизацией в области цифровой безопасности. Использование стеганографических инструментов должно сопровождаться пониманием правовых и этических норм, установленных национальным законодательством и международными стандартами информационной безопасности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонсон Н. Ф., Джаярам С., Катулур С. Стеганография: сокрытие информации в цифровых медиа. — М.: Техносфера, 2003. — 384 с.
2. Anderson R. J., Petitcolas F. A. P. On the Limits of Steganography // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 1998. — Vol. 16, № 4. — P. 474–481.
3. Kahn D. The Codebreakers: The Comprehensive History of Secret Communication from Ancient Times to the Internet. — New York: Scribner, 1996. — 1184 p.
4. Зубков А. А. Введение в стеганографию. Учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — 156 с.
5. Pillow Development Team. Pillow (PIL Fork) Documentation. URL: <https://pillow.readthedocs.io/> (дата обращения: 20.04.2026).
6. Provos N., Honeymann P. Hide and Seek: An Introduction to Steganography // IEEE Security & Privacy. — 2003. — Vol. 1, № 3. — P. 32–44.
7. Гринфельд М. И. Тайные знаки в живописи Возрождения. — СПб.: Искусство-СПБ, 2011. — 224 с.
8. ISO/IEC 23005-3:2020. Information technology – Multimedia application platform (MAP) – Part 3: Steganography. — International Organization for Standardization, 2020.
9. Cheddad A. et al. Digital Image Steganography: Survey and Analysis of Current Methods // Signal Processing. — 2010. — Vol. 90, № 3. — P. 727–752.
10. NumPy Developers. NumPy Reference Documentation. URL: <https://numpy.org/doc/> (дата обращения: 20.04.2026).

УДК 621.311:658.26:004.9

**Азяев<sup>1</sup> А.А., Засимов<sup>2</sup> Д.С., Михайлов<sup>3</sup> С.А.**

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> azyaev@mail.ru

<sup>2</sup> zasimov86@yandex.ru

<sup>3</sup> mihailev989@gmail.com

### **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ПЕРЕХОД ОТ ЭКОНОМИИ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ**

**Аннотация.** Рассматривается трансформация подходов к энергоэффективности российских промышленных предприятий в условиях новой реальности 2026 г. Анализируется переход от стратегии простого сокращения потребления к внедрению систем интеллектуального управления ресурсами как способа преодоления прогнозируемого дефицита мощностей к 2032 г. Особое внимание уделяется ключевому технологическому прорыву – внедрению цифровых двойников на базе искусственного интеллекта и промышленного интернета вещей. Отдельным блоком представлена технология управления спросом. Разъясняется экономический механизм вознаграждения предприятий за добровольное снижение нагрузки в пиковые часы. В заключение делается вывод, что интеграция инженерных решений с ИТ-инструментами позволяет не только снизить энергопотребление, но и существенно сократить сроки окупаемости инвестиций, обеспечивая предприятиям конкурентоспособность.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, цифровые двойники, искусственный интеллект, интернет вещей, управление спросом, промышленность

**Azyayev<sup>1</sup> A.A., Zasimov<sup>2</sup> D.S., Mikhailov<sup>3</sup> S.A.**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> azyaev@mail.ru

<sup>2</sup> zasimov86@yandex.ru

<sup>3</sup> mihailev989@gmail.com

### **ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES AS A TRANSITION FROM SAVINGS TO INTELLIGENT MANAGEMENT**

**Abstract.** The article examines the transformation of approaches to the energy efficiency of Russian industrial enterprises in the context of the new reality of 2026. The authors analyze the transition from simple consumption reduction strategies to the implementation of intelligent resource management systems as a way to overcome the predicted power shortage by 2032. Special attention is paid to a key technological breakthrough – the implementation of digital twins based on artificial intelligence and the industrial internet of things (IIoT). A separate section presents the demand response technology. The article explains the economic mechanism of rewarding enterprises for voluntary load reduction during peak hours. In conclusion, the authors state that the integration of engineering solutions with IT tools not only reduces energy consumption but also significantly shortens the payback period of investments, ensuring the competitiveness of enterprises.

**Keywords:** energy efficiency, digital twins, artificial intelligence, internet of things, demand response, industry

В 2026 году промышленный сектор России столкнулся с новой реальностью. На фоне изменения структуры федерального бюджета, где доля нефтегазовых доходов упала ниже 20%, ставка сделана на высокотехнологичные отрасли: машиностроение, микроэлектронику и ОПК. Однако амбициозные планы роста упираются в «энергетический потолок» – прогнозируемый дефицит мощностей к 2032 году.

В этих условиях **энергоэффективность** перестала быть просто пунктом в экологической повестке и превратилась в стратегический инструмент выживания промышленности.

Долгое время понятия «энергосбережение» и «энергоэффективность» путали. Но если первое – это просто сокращение потребления (часто в ущерб процессам), то второе – это рациональное использование ресурсов без потери производительности.

Сегодня модернизация в сфере повышения энергоэффективности для промышленных предприятий опирается на три кита:

**Техническое перевооружение:** установка частотно-регулируемых приводов (ЧРП) на насосы и компрессоры, замена лампочек накаливания на светодиодные, установка утепленных окон, модернизация котлов, позволяет мгновенно снизить затраты на электроэнергию на **30–50%**.

**Рекуперация тепла:** использование «сбросного» тепла от печей для отопления цехов превращает побочные продукты производства в бесплатный ресурс.

**Распределенная генерация:** установка солнечных панелей на крышах заводов и использование когенерационных установок стали массовым трендом, позволяя предприятиям частично перейти на самообеспечение.

По предварительным оценкам главным технологическим прорывом 2026 года станет внедрение **цифровых двойников (Digital Twins)**. Это не просто 3D-модели, а динамические копии цехов, работающие на базе искусственного интеллекта (ИИ) и датчиков промышленного интернета вещей (IIoT).

Промышленный интернет вещей – это сеть умных датчиков, которые обмениваются данными в реальном времени измеряют температуру, давление, ток и вибрацию. Данные передаются в облако в реальном времени, что позволяет исключить человеческий фактор при сборе показателей.

Для обработки полученных массивов данных используют искусственный интеллект на базе нейронных сетей. Это специфический метод внутри машинного обучения, который имитирует работу биологических нейронов мозга для обработки сложных данных. Искусственный интеллект на основе нейронных сетей «учится» на миллиардах примеров и сам выстраивает связи, которые программист не прописывал вручную.

При наличии соответствующей инфраструктуры цифровой двойник позволяет:

**Найти «энергетических паразитов»:** выявить скрытые микроутечки воздуха в пневмосистемах, которые незаметны для персонала, но увеличивают счета на 20%.

**Проводить виртуальные испытания:** просчитать, как изменение скорости конвейера или графика смен отразится на итоговом чеке за электричество еще до внесения изменений в реальности.

**Предиктивное обслуживание:** система сигнализирует о необходимости смазки подшипника, если станок начинает потреблять больше мощности при той же нагрузке.

Применение цифровых двойников в комплексе с системой энергоменеджмента (EMS) и искусственным интеллектом позволяет в режиме реального времени проводить анализ энергопотребления предприятия, делать прогноз пиковых нагрузок, автоматически корректировать работу оборудования и, в результате, добиться снижения общего энергопотребления на **5–15%**, что позволяет существенно сократить срок окупаемости инвестиций.

Новым словом в отрасли стала технология **Demand Response** (управление спросом). Автоматическое управление спросом – это технология, позволяющая промышленным предприятиям автоматически, добровольно корректировать потребление электроэнергии в ответ на сигналы от энергосистемы или изменение цен на рынке. В основе технологии лежит экономическая мотивация: энергосистеме дешевле заплатить потребителю за «непотребление», чем строить новые электростанции или запускать дорогие неэффективные резервы. В 2026 году этот механизм стал ключевым инструментом повышения энергоэффективности и снижения затрат.

В отличие от классической экономии ресурсов, управление спросом направлено на оптимизацию нагрузки. Выделяют три основных способа реализации управления спросом: снижение пикового потребления, смещение нагрузки, использование накопителей.

Для снижения пикового потребления система автоматически отключает или ограничивает работу второстепенного оборудования (насосов, систем вентиляции, зарядных станций) в часы максимальной нагрузки на сеть.

При выборе ценовой категории, для которой стоимость электроэнергии дифференцирована по часам суток, заводы могут переносить энергоемкие процессы на периоды низких цен.

При наличии накопителей автоматика переключает питание предприятия на промышленные аккумуляторы в моменты пиковых цен, не останавливая техпроцесс.

Для управления спросом (Demand Response) подходят установки, которые имеют тепловую или механическую инерцию: их можно выключить на 1–4 часа без остановки всего завода. В качестве примера можно привести:

а) системы сжатого воздуха. Компрессоры потребляют до 10–20% всей энергии завода. При наличии больших ресиверов (баки для хранения воздуха), их можно «накачать» заранее. В пиковый час компрессоры отключаются, а производство работает на запасенном давлении.

б) электропечи (индукционные, дуговые). Обладают огромной тепловой инерцией. Кратковременное снижение мощности (на 30–60 минут) почти не влияет на температуру расплава, но резко снижает нагрузку на сеть.

в) сушильные установки: Процессы сушки древесины, зерна или керамики позволяют делать паузы в нагреве. Главное – настроить автоматику так, чтобы влажность оставалась в пределах нормы.

В инженерной инфраструктуре промышленного предприятия экономия достигается за счет «аккумуляции» холода или воды.

Системы кондиционирования и чиллеры. Здания остывают и нагреваются медленно. Можно временно отключить чиллеры или поднять уставку температуры на 2–3 градуса. Сотрудники этого не заметят, а потребление упадет на мегаватты.

Насосы водоснабжения и КНС. Если на предприятии есть накопительные резервуары или водонапорные башни, насосы можно выключать в часы пик. Вода будет идти самотеком или из запасов, а насосы включатся ночью, когда энергия дешевле.

Промышленное освещение. В цехах с панорамными окнами или в логистических центрах освещение можно диммировать (снижать яркость) на 20–30%. Глаз адаптируется, а суммарная нагрузка заметно снизится.

Сегодня в Российской Федерации существуют агрегаторы управления спросом. Это специализированные компании, которые объединяют мощности множества потребителей в единый виртуальный ресурс и продают эту гибкость системному оператору, выплачивая предприятиям вознаграждение. На их базе развернуты интеллектуальные системы управления – ПО с использованием искусственного интеллекта, которое прогнозирует график нагрузки и принимает решение о снижении потребления без ущерба для производства. Умные счетчики и датчики обеспечивают двустороннюю связь между предприятием и диспетчером в режиме реального времени.

В России предприятия получают выплаты от «Системного оператора» за готовность снизить нагрузку по команде (программы Demand Response). В ряде регионов РФ (Удмуртия, Алтай) уже работают электронные площадки, где предприятия получают прямые выплаты от системного оператора за свою гибкость. В 2024 году механизм позволил сэкономить потребителям оптового рынка около 1 млрд рублей за счет снижения пиковых цен.

#### **Вывод**

В реалиях 2026 года энергоэффективность окончательно трансформировалась из экологической инициативы в критически важный инструмент выживания российской промышленности. В условиях прогнозируемого дефицита мощностей к 2032 году и изменения структуры экономики, ставка на высокотехнологичные отрасли (микроэлектроника, ОПК) невозможна без качественного изменения подходов к энергопотреблению.

Главным вектором развития признается синергия «жестких» инженерных решений и гибкого ИТ-управления. Если техническое перевооружение (ЧРП, рекуперация) дает немедленный эффект, то внедрение цифровых двойников и ИИ обеспечивает долгосрочную оптимизацию. Эти технологии позволяют не только выявлять скрытые потери («энергетических паразитов»), но и превращают предприятие в активного участника энергорынка через механизмы **Demand Response**.

Итогом такой трансформации становится переход от пассивного потребления к интеллектуальному управлению спросом, что позволяет предприятиям не только сокращать издержки на 5–15%, но и получать прямые выплаты от энергосистемы за свою гибкость. В конечном счете, цифровизация энергоменеджмента – это кратчайший путь к сохранению ценовой конкурентоспособности продукции и успешной декарбонизации производства в долгосрочной перспективе.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» (принят Государственной думой 11 ноября 2009 года; одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 года).
2. Данилов, О. Л. Энергосбережение в промышленности : учебное пособие / О. Л. Данилов, С. В. Костюченко ; под редакцией О. Л. Данилова. – Москва : Изд-во МЭИ, 2011.
3. Куприяновский, В. П. Цифровые двойники – на пути к государственному стандарту / В. П. Куприяновский, П. В. Куприяновский, С. А. Синягов [и др.]. // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2020. – Т. 8, № 5. – С. 56–61
4. Интеллектуальные системы управления энергопотреблением : монография / под редакцией И. А. Башмакова. – Москва : Изд-во ЦЭНЭФ, 2017.

УДК 331.101.1.

**Андреева<sup>1</sup> И.П., Андреева<sup>2</sup> Т.В., Гришко<sup>3</sup> А.К., Горячев<sup>4</sup> Н.В.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> apg\_58@mail.ru

<sup>2</sup> andreevat\_1979@mail.ru

<sup>3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

## **РАЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА ОПЕРАТОРА С УЧЁТОМ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы рациональной организации рабочего места оператора с учётом эргономических требований.

**Ключевые слова:** рабочее место оператора, эргономические требования, уровень шума, освещение, рабочее пространство

**Andreeva<sup>1</sup> I.P., Andreeva<sup>2</sup> T.V., Grishko<sup>3</sup> A.K., Goryachev<sup>4</sup> N.V.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> apg\_58@mail.ru

<sup>2</sup> andreevat\_1979@mail.ru

<sup>3,4</sup> kipra@pnzgu.ru

## **RATIONAL ORGANIZATION OF THE OPERATOR'S WORKPLACE TAKING INTO ACCOUNT ERGONOMIC REQUIREMENTS**

**Abstract.** Issues of rational organization of the operator's workplace taking into account ergonomic requirements are considered.

**Keywords:** operator's workplace, ergonomic requirements, noise level, lighting, workspace

Правильная организация работы по охране труда имеет первостепенное значение для повышения производительности труда, ликвидации причин несчастных случаев, предупреждения профессиональных заболеваний. Это особенно важно при проектировании современной радиоэлектронной аппаратуры как фактора качества на всех этапах жизненного цикла радиоэлектронного средства (РЭС). [1, 2, 3, 4, 5]. Поэтому рациональная организация рабочего места оператора с учётом эргономических требований является актуальной проблемой. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

В современных условиях научная организация труда основана на достижениях науки, передовом опыте, систематически внедряемых в производство. Это позволяет наилучшим образом соединить технику и людей в едином производственном процессе, обеспечивает наиболее эффективное использование трудовых ресурсов, непрерывный рост производительности труда, способствует сохранению здоровья человека, постоянному превращению труда в первую жизненную потребность. Надо иметь в виду, что чем рациональнее устроено рабочее место, тем меньше непроизводительные потери рабочего времени.

Рабочим местом считается место постоянного или периодического пребывания работающего для наблюдения и ведения производственных процессов или эксперимента. Под организацией рабочего места понимают систему мероприятий по созданию на рабочем месте необходимых условий для достижения высокопроизводительного труда. Задачей охраны труда является обеспечение человеку таких условий работы и такой организации его рабочего места, чтобы при максимальной производительности труда утомляемость была минимальной, и отсутствовали бы нервные перенапряжения.

Нормальная обстановка на рабочем месте обеспечивается санитарно-гигиеническими и эстетическими условиями, то есть рациональным освещением, цветовым оформлением, отсутствием шума, вибраций, пыли. Улучшение порядка, чистоты в помещениях оказывает значительное влияние на состояние конструктора, на его производительность труда.

Человек-конструктор и РЭС представляют собой две части комплекса, для нормальной работы которого необходимо соответствующее их согласование. Для того чтобы принять какое-либо решение, конструктор должен иметь достаточное количество информации от РЭС. Эту информацию он может получить за счет зрительного, слухового, обонятельного анализаторов.

Охрана труда - система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда. Научно-технический прогресс внес серьезные изменения в условия производственной деятельности работников умственного труда.

Охрана труда представляет собой систему законодательных актов, норм, правил, экономических, технических и лечебно-профилактических мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранения здоровья и работоспособность человека в процессе труда.

Охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасности условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма составляет одну из главных забот человеческого общества.

Операторы ЭВМ сталкиваются с воздействием таких физически опасных и вредных факторов, как повышенный уровень шума, повышенная температура внешней среды, отсутствие или недостаток естественного света, недостаточная освещённость рабочей зоны, электрический ток, статическое электричество и другие. Все эти факторы снижают производительность труда и приводят к профессиональным заболеваниям.

Опасные и вредные производственные факторы подразделяются на 4 группы: физические, химические, биологические и психофизиологические.

К группе физических опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) относятся следующие: механические факторы силового воздействия, механические колебания (вибрация), акустические колебания, электромагнитные поля и излучения, ионизирующие излучения, электрический ток, повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования и материалов. Источниками механических факторов силового воздействия могут быть станки и оборудование, используемые при изготовлении корпуса изделия, а именно прессы, сверлильные станки. Также, в какой то мере, опасными для рабочего могут быть острые кромки, заусенцы, металлическая стружка, образующиеся после обработки заготовки методами штамповки и сверления. Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов возникает при штамповке и сверлении металлов вследствие трения инструмента о заготовку и деформации заготовки вследствие воздействия на нее инструмента, а также монтаже печатной платы, так как данная работа выполняется с применением электронагревательных приборов, рабочая температура которых доходит до 200<sup>о</sup>С. Такая высокая температура необходима для расплавки припоев. При монтаже и регулировке печатной платы опасность представляет также и электрический ток. А именно, как уже упоминалось выше, при монтаже печатной платы используются электронагревательные приборы, которые находятся под напряжением, опасным для жизни и здоровья человека. При регулировке устройства необходимо чтобы оно было подключено к промышленной сети 220 В.

Рабочее место оператора - это место в системе "человек-машина", на котором осуществляется его трудовая деятельность, оснащенное средствами отображения информации, органами управления и вспомогательным оборудованием.

В научной организации труда инженера - оператора ЭВМ можно выделить несколько основных направлений:

- Рациональное распределение труда, специализация,
- Организация рабочего места и механизация ряда операций труда,
- Разработка мер по повышению творческой активности и культуры труда,
- Организация мер по повышению квалификации операторов в связи с ростом объема приобретенных знаний.

Правильная организация труда и рабочего места оператора ЭВМ является важным резервом по повышению эффективности труда. Для стимулирования творческой активности рекомендуется для ИТР (инженерно-технических работников) выделять комнаты на 5 -6 человек.

По данным исследований оформление помещения с учетом требований инженерной психологии приводит к увеличению производительности труда специалистов примерно на 3 %.

Общие эргономические требования являются основным фактором влияния на рабочее место оператора. Существенным моментом организации рабочего места оператора ЭВМ является оснащённость его средствами оргтехники и связи. Научная организация рабочего места оператора также предполагает рациональное размещение документации, литературы и, при необходимости, картотеки.

При выполнении основной работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не превышает 50 дБ. В помещениях, где работают инженерно-технические работники, осуществляющие лабораторный, аналитический или измерительный контроль, уровень шума не превышает 60 дБ. В помещениях операторов ЭВМ (без дисплеев) уровень шума не превышает 65 дБ. На рабочих местах в помещениях для размещения шумных агрегатов вычислительных машин (АЦПУ, принтеры и т.п.) уровень шума не превышает 75 дБ.

Уровень шума в помещениях с ПЭВМ снижается при использовании звукопоглощающих материалов с максимальным коэффициентом звукопоглощения в области частот 63-8000 Гц для отделки помещений (разрешённых органами и учреждениями Госсанэпиднадзора России), подтверждённых специальными акустическими расчётами.

Дополнительным звукопоглотителем служат занавеси из плотной ткани, подвешенные в складку на расстоянии 15-20 см от ограждения. Занавеси должны быть одно-тонные, гармонирующие с окраской стен, шириной в два раза больше ширины окна.

Производственное освещение помещений также оказывает значительное влияние на рабочее место оператора. Видимое излучение является частью электромагнитного излучения в диапазоне длин волн 380-770 нм. Используют такие количественные показатели, как световой поток, сила света, освещенность, яркость поверхности, коэффициенты отражения, пропускания и поглощения.

Недостаточное освещение вызывает зрительный дискомфорт, выражающийся в ощущении неудобства или напряжения. Длительное пребывание в условиях зрительного дискомфорта приводит к отвлечению внимания, уменьшению сосредоточенности, зрительному и общему утомлению. Кроме создания зрительного комфорта свет оказывает на человека психологическое, физиологическое и эстетическое воздействие. Свет – один из важнейших элементов организации пространства и главный посредник между человеком и окружающим его миром. Неудовлетворительная освещенность в рабочей зоне может являться причиной снижения производительности и качества труда, получения травм.

При организации рабочего места учитываются основные антропометрические и биомеханические данные людей, степень подвижности человека при работе "сидя", потребность в обзоре рабочего места, необходимость использования рабочей поверхности для письма, для установок телефонных аппаратов, а также для хранения инструкций и других материалов.

При работе в положении "сидя" рекомендуются следующие параметры рабочего пространства:

- ширина не менее 700 мм;
- длина не менее 400 мм;
- высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей регулируется в пределах 680-800 мм, при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.

Кресло оператора имеет:

- ширину и глубину поверхности сиденья 450 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углов наклона вперед до 15° и назад до 5°;
- высоту опорной поверхности спинки 300±20 мм, ширину 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах 0±30°;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260-400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной 50-70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах ±230 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350-500 мм;
- обивка кресла гигиеническая (воздухопроницаемая и гигроскопичная).

При проектировании помещения для рабочих мест рассчитывают их размещение друг относительно друга и относительно средств отображения информации коллективного (табло, планшет, экран) и индивидуального пользования (дисплей). Рабочие места размещаются таким образом, чтобы угол наблюдения составил не более 45° к нормали экрана, если он плоский.

Организация рабочего пространства сказывается на общих принципах рабочего места оператора. Для организации рабочего пространства необходимо учитывать основные антропометрические и биомеханические данные того контингента лиц, которому предстоит эксплуатировать рабочее место. Важнейшей характеристикой, определяющей правильную организацию рабочего места оператора, является учет зон досягаемости. На рисунке 1 представлены в горизонтальной плоскости четыре основных зоны досягаемости:

А - Зона максимальной досягаемости, В, С, Д - Зоны личной досягаемости.

В зонах В и Д возможны наиболее быстрые. Точные, координированные и наименее утомляющие движения. Сектор досягаемости для каждой руки имеет угол 180 градусов. Оптимальную рабочую зону представляет зона Д (в ней располагают клавиатуру и рабочий планшет, если необходимо).



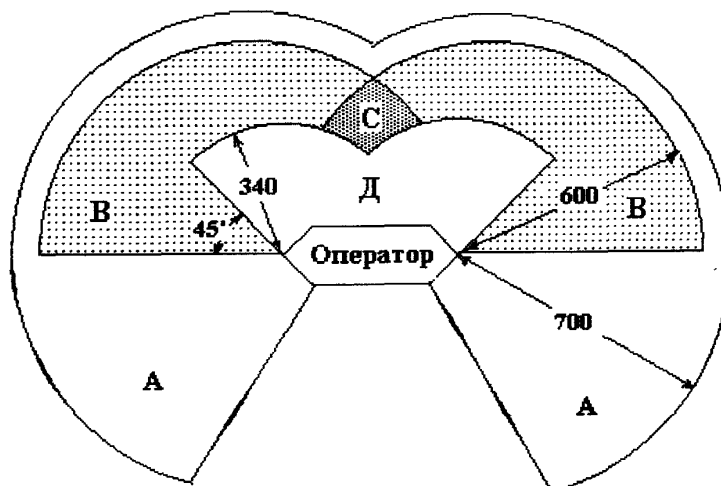


Рисунок 1 – Зоны досягаемости рабочего места оператора

Важным является рациональный режим труда и отдыха оператора. Для того, чтобы регламентируемые перерывы были эффективными, их необходимо организовывать на начальной стадии утомления, т.е. при первых признаках понижения работоспособности. Для операторов ЭВМ рекомендуется делать один 15 минутный перерыв в первой половине рабочего дня (через 2 часа после начала работы) и два перерыва по 5 минут во второй половине рабочего дня (первый через 1,5 часа после начала работы, второй через час после первого).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, П. Г. Методы оценки технологичности конструкции РЭС / П. Г. Андреев, Н. К. Юрков, В. Я. Баннов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2008. – Т. 2. – С. 129-131. – EDN NDPQVB.
2. Возможности "cst studio suite" при проектировании высокочастотных устройств / Е. Р. Шпедт, П. Г. Андреев, А. К. Гришко, И. Ю. Наумова // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2020. – Т. 2. – С. 158-160. – EDN IYQQTQ.
3. Андреев, П. Г. Геоинформационный анализ интерференционной модели радиоканала с учетом отражений от поверхности сложной формы / П. Г. Андреев, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров // Информационные системы и технологии. – 2017. – № 3(101). – С. 89-94. – EDN YPIAVB.
4. Андреев, П. Г. Определение комплексного коэффициента отражения электромагнитных волн внутри помещений / П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова, О. В. Москвитина // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2013. – Т. 2. – С. 5-6. – EDN RUANUP.
5. Андреев, П. Г. Комплексное исследование блока РЭС на примере светоакустической приставки / П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова, М. В. Ширшов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2010. – Т. 2. – С. 137-142. – EDN NDKUOJ.
6. Морозов, Д. И. Защита радиоэлектронных средств от влияния климатических факторов / Д. И. Морозов, П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова // Радиоэлектронная техника. – 2011. – № 1(4). – С. 255-261. – EDN UAEWMB.
7. Климатические и биологические факторы, влияющие на элементы конструкции и параметры РЭС / А. С. Подсякин, П. Г. Андреев, А. М. Мазанов [и др.] // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2018. – Т. 2. – С. 243-244. – EDN YAFGJV.
8. Гришко, А. К. Алгоритм пространственно-параметрического синтеза электромонтажа радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, П. Г. Андреев, В. Я. Баннов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2015. – Т. 1. – С. 181-182. – EDN SCBBKZ.
9. Андреев П.Г. Возможности ANSYS HFSS при проектировании печатных плат и узлов радиоэлектронных средств / Андреев П.Г., Волков В.А., Фирсова Д.И., Китаев М.Б. // Современные информационные технологии. 2015. № 22. С. 25-28.
10. Обеспечение экранирования, экраны и методы их расчётов / О. П. Калашникова, П. Г. Андреев, А. К. Гришко [и др.] // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2022. – Т. 2. – С. 148-150. – EDN NTXSYK.
11. Андреева, Т. В. Прогнозирование показателей научно-исследовательской и инновационной деятельности студентов на основе искусственных нейронных сетей / Т. В. Андреева, П. Г. Андреев, И. И. Сальников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6(34). – С. 104-109. – EDN YMVEAD.
12. Андреев, П. Г. Структурно-разностный анализ элемента, включающего две низинные, негативно-контурную и позитивную пары направлений / П. Г. Андреев, Г. В. Таньков, И. Ю. Наумова // Современные информационные технологии. – 2015. – № 21. – С. 39-43. – EDN TZJFDX.
13. Андреев, П. Г. Использование искусственной нейронной сети типа GRNN в задачах прогнозирования / П. Г. Андреев, Т. В. Андреева, Н. К. Юрков // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2017. – Т. 2. – С. 63-66. – EDN ZEJCGD.

УДК 623.094`

**Годунов<sup>1</sup> А.И., Ерофеев<sup>2</sup> М.В., Мухамбетов<sup>3</sup> А.М., Колесников<sup>4</sup> И.Б.**

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2,3,4</sup> Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва в г. Пензе, Пенза, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> penza.vamto.mil.ru

### **КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ СПЕЦИАЛИСТА ПО ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ МАЛОГАБАРИТНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ**

**Аннотация.** Представлена комплексная модель специалиста по противодействию малогабаритным беспилотным летательным аппаратам, интегрирующая взаимосвязанные функциональные модули полного цикла противодействия – от обнаружения до оценки экономической целесообразности принятых мер. Модель включает следующие компоненты: обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (с применением радиолокационных, оптических, тепловизионных, акустических и радиочастотных средств), классификация и идентификация целей на основе анализа сигнатурных признаков и поведенческих паттернов, оценка угрозы с учётом траектории, скорости, высоты полёта и загрузки полезной нагрузки, выбор оптимального метода противодействия, радиоэлектронное подавление каналов управления и навигации, физическое уничтожение (с использованием дронов-перехватчиков, сетей-ловушек, лазерного оружия и зенитных комплексов), противодействие массированным («роевым») атакам, а также оценка экономической эффективности применяемых мер.

**Ключевые слова:** малогабаритные беспилотные летательные аппараты, обнаружение, классификация целей, идентификация воздушных объектов

**Godunov<sup>1</sup> A.I., Erofeev<sup>2</sup> M.V., Mukhambetov<sup>3</sup> A.M., Kolesnikov<sup>4</sup> I.B.**

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2,3,4</sup> Branch of the Military Academy of Logistic Support named after General of the Army A.V. Khrulyov in Penza, Penza, Russia

<sup>1,2,3,4</sup> penza.vamto.mil.ru

### **A COMPREHENSIVE MODEL FOR A SPECIALIST IN COUNTERING SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES**

**Abstract.** This article presents a comprehensive model for a specialist in countering small unmanned aerial vehicles (SUAVs), integrating interconnected functional modules across the full countermeasure cycle – from detection to cost-benefit assessment. The model includes components for: detecting small unmanned aerial vehicles (using radar, optical, thermal, acoustic, and radio frequency means); classifying and identifying targets based on signature and behavioral pattern analysis; assessing the threat based on trajectory, speed, altitude, and payload; selecting the optimal countermeasure method; electronic jamming of control and navigation channels; physical destruction (using interceptor drones, decoy nets, laser weapons, and anti-aircraft systems); countering massive ("swarm") attacks; and assessing the cost-effectiveness of the measures applied.

**Keywords:** small unmanned aerial vehicles, detection, target classification, identification of aerial objects

В условиях стремительного развития технологий беспилотной авиации и широкого распространения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (МБПЛА) существенно трансформируются угрозы в сфере безопасности – как военной, так и гражданской. Массовое внедрение МБПЛА в различные сферы деятельности, включая разведку, доставку грузов, мониторинг территорий и выполнение ударных задач, сопровождается ростом рисков их неправомерного использования: от несанкционированного наблюдения и нарушения частной жизни до диверсий и террористических атак.

Опыт современных вооружённых конфликтов наглядно демонстрирует, что МБПЛА всё чаще применяются в групповых операциях, где их малые размеры, низкая радиолокационная заметность и относительная доступность создают серьёзные вызовы для традиционных систем противовоздушной обороны (ПВО). Существующие средства обнаружения и нейтрализации зачастую оказываются недостаточно эффективными против малоразмерных целей, движущихся на малых высотах и со скоростями, близкими к скоростям ветра, а также способных действовать в составе роя.

В связи с этим критически возрастает потребность в специалистах нового профиля – экспертах по противодействию МБПЛА, способных комплексно решать задачи обнаружения, идентификации, отслеживания и нейтрализации подобных угроз с применением современных технических средств и тактических приёмов. Формирование модели такого специалиста требует системного подхода: необходимо определить необходимый набор компетенций, включающий знания в области радиоэлектроники, оптики, кибербезопасности, искусственного интеллекта, навигации и управления БПЛА, а также практические навыки работы с системами радиоэлектронной борьбы (РЭБ), лазерными средствами поражения, сетями-ловушками и специализированными дронами-перехватчиками.

Цель данной статьи – разработать и обосновать модель специалиста по противодействию малогабаритным беспилотным летательным аппаратам, включающую:

– перечень профессиональных компетенций и квалификационных требований;

- описание необходимых технических знаний и практических навыков;
- типовые сценарии действий в условиях различных угроз;
- рекомендации по обучению и подготовке кадров.

Предложенная модель призвана стать основой для создания образовательных программ, стандартов подготовки и методических рекомендаций, направленных на повышение эффективности противодействия угрозам, связанным с применением МБПЛА. В современной научно-технической литературе представлен обширный спектр методологических подходов и инженерно-технических решений, направленных на обнаружение МБПЛА и противодействие их функционированию [1–10]. Базис данных решений формируется на основе применения обнаружителей различных классов: пассивных, полуактивных, активных, а также многоканальных измерительно-аналитических систем, функционирующих в спектральных диапазонах электромагнитного излучения и акустических волновых полей.

Одним из перспективных методологических подходов является метод пассивного обнаружения и определения пространственных координат МБПЛА. Его принципиальная отличительная черта заключается в реализации специализированного алгоритма расчёта угловых координат объекта наблюдения [1, 2]:

- горизонтальный угол определяется на основе анализа параллактического смещения характерных точек изображения на матрице оптического сенсора;
- вертикальный угол рассчитывается с учётом приращения смещения по ортогональной оси ПЗС-матрицы.

Ключевым интегральным показателем эффективности систем обнаружения МБПЛА выступает точность определения пространственных координат аппарата, а также возможность экстраполяции его траектории и прогнозирования вероятного местоположения в заданный момент времени. Данная информация имеет критическое значение для своевременного развёртывания мер противодействия, минимизации времени реакции системы и оптимизации распределения ресурсов противодействия.

Особый научный и практический интерес представляет метод определения пространственных координат летательных аппаратов на основе двух дирекционных углов и угла места. Данный подход базируется на геометрико-аналитическом принципе локализации объекта как точки пересечения прямой (направление визирования) и плоскости (референц-поверхность или условная плоскость отсчёта). Реализация указанного метода позволяет существенно сократить временные затраты на обработку данных, поступающих от сенсоров, функционирующих в оптическом и радиолокационном диапазонах электромагнитных волн, за счёт снижения размерности решаемой задачи и упрощения вычислительных процедур [2].

Для нейтрализации МБПЛА могут применяться специализированные технические средства различного функционального назначения, в т.ч.:

- устройства-истребители МБПЛА [3];
- FPV-дроны-камикадзе;
- сети-ловушки для захвата дистанционно пилотируемых летательных аппаратов [4].

Рассмотрим конструктивно-функциональные особенности устройства - истребителя МБПЛА. Данное техническое средство представляет собой специализированный МБПЛА-носитель, оснащённый интегрированным комплексом систем и устройств, обеспечивающих выполнение задачи поражения воздушных целей. В состав устройства входят:

- МБПЛА-платформа (носитель);
- автоматическая система управления с элементами искусственного интеллекта (ИИ), реализующая алгоритмы адаптивного управления и принятия решений;
- парашютная система для безопасного возвращения компонентов;
- детонатор для активации поражающих элементов;
- камеры кругового обзора (не менее пяти единиц) для панорамного мониторинга пространства;
- шесть последовательно размещённых отсеков в нижней части фюзеляжа для размещения устройств поражения с заданной секционной направленностью действия.

Существующий метод ослепления оптико-электронных систем МБПЛА базируется на следующей физической и технической концепции. Процесс функционирования системы осуществляется следующим образом:

Электромагнитное излучение, исходящее от МБПЛА, распространяется в атмосфере и регистрируется блоком обнаружения, интегрированным с автоматизированной системой обработки информации (БОиАСОИ).

Полученная информация подвергается комплексной обработке в БОиАСОИ, которая формирует управляющий сигнал для источника лазерного излучения.

БОиАСОИ обеспечивает [5]:

- расчёт оптимальной мощности лазерного излучения с учётом дистанции до цели и атмосферных условий;
- определение необходимой площади светового воздействия для достижения требуемого эффекта ослепления;
- корректировку пространственного положения светового экрана в режиме реального времени с учётом динамики движения цели.

Современные системы противодействия МБПЛА характеризуются глубокой интеграцией передовых технических решений, основанных на:

- централизованном управлении средствами обнаружения МБПЛА;
- обработке информационных потоков с использованием высокопроизводительных вычислительных систем;
- применении методов машинного обучения и когнитивного моделирования.

Ключевую роль в таких системах играет электронно-вычислительная машина, оснащённая элементами ИИ. Данный компонент выполняет следующие функции [6, 7]:

- пространственное управление средствами обнаружения МБЛА;
- обработку массивов данных в режиме реального времени с применением параллельных вычислительных алгоритмов;
- анализ и интерпретацию поступающих сигналов с использованием методов цифровой фильтрации и распознавания образов;
- принятие решений в условиях динамически изменяющейся обстановки на основе адаптивных моделей;
- формирование управляющих команд для исполнительных механизмов системы противодействия с учётом ограничений и целевых критериев эффективности.

Таким образом, современные системы обнаружения и противодействия МБПЛА представляют собой сложные киберфизические системы, объединяющие сенсоры различного типа, вычислительные модули на базе ИИ и исполнительные механизмы, обеспечивающие комплексное решение задач противодействия в условиях неопределённости и противодействия со стороны противника. Система управления комплексными методами противодействия МБПЛА реализуется на базе интегрированной программно-аппаратной платформы, структурно включающей высокопроизводительный процессор с ИИ, мультисенсорную подсистему визуального мониторинга, представленную массивом камер кругового обзора (не менее пяти единиц), а также мехатронные исполнительные механизмы управления МБПЛА, реализованные на основе ПЗС-матриц малого формата с оптимизированными параметрами пространственного разрешения и чувствительности. Процесс передачи управляющих команд на центральный процессор осуществляется посредством двухрежимного протокола взаимодействия: превентивного конфигурирования, выполняемого на этапе предполётной подготовки МБПЛА, и динамической коррекции, реализуемой в режиме реального времени в процессе мониторинга воздушного пространства с использованием распределённой вычислительной среды на базе электронно-вычислительной машины, оснащённой специализированными ИИ-алгоритмами обработки данных и принятия решений [8].

Описанная система управления классифицируется как гибридная архитектура смешанного типа, сочетающая детерминированные программируемые алгоритмы и механизмы дистанционного управления с элементами адаптивной самонастройки. Подобная архитектура демонстрирует высокую эффективность при проектировании роботизированных комплексов обнаружения и нейтрализации FPV-дронов, обеспечивая оперативную реконфигурацию тактических сценариев противодействия, адаптацию к динамически изменяющимся условиям воздушной обстановки и оптимизацию ресурсозатрат на выполнение целевых задач.

Автоматизированное определение пространственных координат БЛА базируется на комплексном анализе мультисенсорных данных и обеспечивает следующие функциональные преимущества: реализацию полностью автоматизированного цикла определения координат БЛА с последующей передачей разведывательной информации и формированием управляющих воздействий для поражения целей; минимизацию временных затрат на обнаружение МБПЛА и расчёт пространственных координат за счёт параллельной обработки данных от распределённых сенсорных модулей; снижение среднеквадратической ошибки определения координат до уровня инструментальной погрешности измерительных средств посредством применения алгоритмов цифровой фильтрации и коррекции данных; исключение трудоёмких процедур визуального определения полярных координат МБПЛА, сопряжённых с субъективными ошибками оператора; декомпозицию временных показателей процессов обнаружения, определения координат и обработки информации, что обеспечивает устойчивую двустороннюю связь с МБПЛА в автоматизированном режиме с гарантированной задержкой передачи данных.

Достижение указанных функциональных характеристик обеспечивается интеграцией следующих технических компонентов: мультиспектральной подсистемы камер кругового обзора с пространственно ориентированным видеомонитором;

высокопроизводительной ЭВМ с параллельной архитектурой для обработки больших массивов данных в реальном времени; лазерного дальномера с адаптивной системой подсветки цели, функционирующего в импульсно-периодическом режиме с модуляцией частоты излучения [9].

Для решения специализированных задач захвата и эвакуации FPV-дронов (включая транспортировку перехваченного аппарата в безопасную зону) целесообразно применение малогабаритных роботизированных комплексов противодействия МБПЛА. Типовая конфигурация такого комплекса включает автономную транспортную платформу с системой навигации и маршрутизации, обеспечивающую доставку комплекса в запрограммированный район или на участок с оптимальным рельефом местности для эвакуации захваченного МБПЛА; два модуля радиоэлектронного подавления с секционной направленностью излучения, формирующие непроницаемую спектрально-селективную плёнку красителя на оптических средствах наблюдения и разведки МБПЛА противника в видимом и ближнем ИК-диапазоне электромагнитного спектра; два модуля кинетического поражения с остроконечными поражающими элементами, оптимизированными по массе, форме и баллистическим характеристикам для эффективного физического уничтожения МБПЛА.

Проведённый комплексный анализ современных научно-технических решений и патентных разработок позволяет сформулировать обобщающий вывод: эволюция методов и средств обнаружения и противодействия FPV-дронам характеризуется устойчивой тенденцией к глубокой интеграции систем управления на базе технологий искусственного интеллекта. Внедрение ИИ-алгоритмов в архитектуру робототехнических комплексов обеспечивает повышение точности и оперативности обнаружения МБПЛА за счёт применения методов машинного зрения и глубокого обучения, оптимизацию тактических решений в условиях неопределённости посредством когнитивного моделирования сценариев атак, автоматизацию процессов сопровождения и нейтрализации целей с учётом динамических характеристик МБПЛА и факторов внешней среды, а также масштабируемость архитектуры системы для интеграции новых сенсорных модулей и исполнительных механизмов.

Таким образом, перспективные системы противодействия МБПЛА базируются на конвергенции передовых технологий ИИ, робототехники и мультисенсорного мониторинга, что открывает новые возможности для обеспечения комплексной защиты критически важных объектов от угроз, связанных с применением МБПЛА [10].

Комплексная модель специалиста по противодействию малогабаритным беспилотным летательным аппаратам состоит из нескольких моделей: обнаружения МБПЛА; классификации и идентификации; оценки угрозы; выбора метода противодействия; радиоэлектронного подавления (РЭВ); физического уничтожения; противодействия массовой атаки; экономической эффективности.

Методы обнаружения: радиолокационное; оптико-электронное; акустическое; радиочастотное.

1. Математическая модель вероятности обнаружения:

$$P_{\text{обн}} = 1 - e^{-\lambda \cdot T_{\text{обзора}}}$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока сигналов от МБПЛА;  $T_{\text{обзора}}$  – время обзора зоны.

2. Модель обнаружения МБПЛА

Вероятность обнаружения за время обзора:

$$P_{\text{обн}} = 1 - e^{-\lambda \cdot T_{\text{обзора}}}$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока сигналов от МБПЛА (1/с);  $T_{\text{обзора}}$  – время обзора зоны (с).

Дальность обнаружения РЛС:

$$D_{\text{обн}} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_{\min}}}$$

где  $P_t$  – мощность передатчика (Вт);  $G_t, G_r$  – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн;  $\lambda$  – длина волны (м);  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния МБПЛА (м<sup>2</sup>);  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T_0$  – температура (К);  $B$  – полоса пропускания (Гц);  $F$  – коэффициент шума приёмника;  $(SNR)_{\min}$  – минимальное отношение сигнал/шум.

3. Модель классификации и идентификации

Расстояние Махаланобиса для классификации:

$$D^2 = (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu),$$

где  $x$  – вектор признаков текущего объекта;  $\mu$  – средний вектор признаков класса «МБПЛА»;  $\Sigma$  – ковариационная матрица.

Вектор признаков

$$x = [V, H, a, f_{RF}, f_{ac}],$$

где  $V$  – скорость (м/с);  $H$  – высота (м);  $a$  – ускорение (м/с<sup>2</sup>);  $f_{RF}$  – частота радиосигнала (Гц);  $f_{ac}$  – акустическая частота (Гц).

4. Модель оценки угрозы

Интегральный показатель угрозы:

$$U = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{p_i}{p_{i,max}},$$

где  $w_i$  – весовой коэффициент параметра;  $p_i$  – текущее значение параметра;  $p_{i,max}$  – максимальное значение параметра.

Пример для 3 параметров:

$$U = w_1 \cdot \frac{V}{V_{max}} + w_2 \cdot \frac{H}{H_{max}} + w_3 \cdot P_{обн}.$$

5. Модель выбора метода противодействия

Матрица решений

Таблица

| Уровень угрозы     | Метод противодействия  | Эффективность, $E$ |
|--------------------|------------------------|--------------------|
| $U < 0,3$          | Мониторинг             | 0,2                |
| $0,3 \leq U < 0,7$ | РЭБ                    | 0,6                |
| $U \geq 0,7$       | Физическое уничтожение | 0,9                |

6. Модель радиоэлектронного подавления (РЭБ)

Эффективность РЭБ:

$$E_{РЭБ} = \frac{P_{передатчика}}{P_{порог}} \cdot \frac{G_{антенны}}{4\pi R^2} \cdot T_{воздействия},$$

где  $P_{передатчика}$  – мощность передатчика помех (Вт);  $P_{порог}$  – порог чувствительности приёмника МБПЛА (Вт);  $G_{антенны}$  – коэффициент усиления антенны;  $R$  – расстояние до МБПЛА (м);  $T_{воздействия}$  – время воздействия (с).

Вероятность подавления канала управления:

$$P_{подавл} = 1 - e^{-k \cdot E_{РЭБ}},$$

где  $k$  – коэффициент эффективности РЭБ.

7. Модель физического уничтожения

Вероятность поражения при огневом воздействии:

$$P_{поражения} = 1 - (1 - P_{попадания})^{N_{выстрелов}},$$

где  $P_{попадания}$  – вероятность попадания одним выстрелом;  $N_{выстрелов}$  – количество выстрелов.

Для лазерного оружия:

$$P_{пораж\_лазер} = \Phi \cdot \left( \frac{D_{цели}}{R} \right)^2 \cdot t_{возд},$$

где  $\Phi$  – плотность энергии излучения (Дж/м<sup>2</sup>);  $D_{цели}$  – диаметр цели (м);  $t_{возд}$  – время воздействия (с).

8. Модель противодействия массированной атаке

Вероятность противодействия группе МБПЛА:

$$P_{прот} = P_{обст} \cdot P_{1ц\_прот},$$

где  $P_{обст}$  – вероятность реализации одного цикла противодействия;  $P_{1ц\_прот}$  – вероятность противодействия одному МБПЛА за один цикл.

Время цикла противодействия:

$$T_{к.ц.с.} = \frac{T_{1\_ц.с.}}{n},$$

где  $T_{1\_ц.с.}$  – среднее время цикла противодействия одной системой (с);  $n$  – количество систем противодействия.

Среднее время цикла:

$$T_{1\_ц.с.} = T_{обн} + T_{удер} + T_{выст} + T_{перезаряд},$$

где  $T_{обн}$  – время обнаружения (с);  $T_{удер}$  – время удержания в прицеле (с);  $T_{выст}$  – время выстрела (с);  $T_{перезаряд}$  – время перезарядки (с).

9. Модель экономической эффективности

Ожидаемая стоимость противодействия:

$$C_{прот} = C_{1ц\_прот} \cdot \frac{1}{P_{1ц\_прот}},$$

где  $C_{1ц\_прот}$  – стоимость одного цикла противодействия (руб.);  $P_{1ц\_прот}$  – вероятность успешного противодействия за один цикл.

В ходе исследования разработана комплексная модель специалиста по противодействию МБПЛА, интегрирующая ряд взаимосвязанных функциональных модулей, охватывающих полный цикл противодействия – от первичного обнаружения до оценки экономической целесообразности принятых мер с учётом применяемых методов обнаружения и способов борьбы.

Модель включает следующие компоненты:

Модель обнаружения МБПЛА, предусматривающая применение разнородных сенсоров: радиолокационных станций (в т.ч. сверхкороткоимпульсных РЛС X-диапазона), оптических и тепловизионных систем (с тепловизорами и сверхконтрастными камерами видимого диапазона), акустических детекторов, средств радиомониторинга и пассивных когерентных локаторов. Это позволяет выявлять МБПЛА в различных условиях (время суток, погода, рельеф), определять их траекторию и параметры движения.

Модель классификации и идентификации, основанная на анализе сигнатурных признаков (радиочастотных, оптических, акустических) и поведенческих паттернов. Используются методы машинного обучения для дифференциации МБПЛА по типу, назначению, техническим характеристикам и потенциальной угрозе.

Модель оценки угрозы, формирующая ранжированный перечень целей по степени опасности с учётом траектории, скорости, высоты полёта, загрузки полезной нагрузки, близости к охраняемым объектам и иных факторов. Применяются алгоритмы прогнозирования траектории и оценки риска.

Модель выбора метода противодействия, предлагающая оптимальный набор мер нейтрализации на основе комплексного анализа обстановки, доступных ресурсов и заданных критериев эффективности. Учитываются тип МБПЛА, его назначение, условия применения и специфика охраняемой зоны.

Модель радиоэлектронного подавления (РЭБ), предусматривающая применение средств РЭБ для нарушения каналов управления, навигации (ГЛОНАСС, GPS и др.) и передачи данных МБПЛА. Включает постановку заградительных и прицельных помех, блокировку сигналов сотовой связи (LTE, 3G, GSM), создание ложных навигационных полей и принуждение к аварийной посадке. Используются комплексы типа «Гарпун», REX-1, ZONT, «Солярис-Н» и др.

Модель физического уничтожения, включающая тактические и технические решения по применению кинетических и некинетических средств поражения: дронов-перехватчиков, сетей-ловушек с парашютной системой, лазерного оружия, зенитных комплексов ближнего действия («Тор», «Стрела-10М3», «Панцирь-С1»), стрелкового оружия и специализированных антидроновых ружей.

Модель противодействия массированной атаке («роевому» сценарию), регламентирующая действия при групповом применении МБПЛА. Предусматривает распределение целей, координацию средств поражения (в т.ч. комбинированное применение РЭБ и кинетических средств), управление ресурсами, эшелонированную оборону и адаптивное перераспределение задач между средствами обнаружения и поражения.

Модель экономической эффективности, оценивающая соотношение затрат на реализацию мер противодействия и уровня снижения угрозы. Проводится сравнительный анализ стоимости различных методов (модернизация существующих систем ПВО, разработка специализированных комплексов, применение РЭБ, кинетического оружия), расчёт окупаемости и выбор оптимального решения с учётом специфики защищаемого объекта и вероятных сценариев атаки.

Реализация предложенной комплексной модели позволяет:

- повысить оперативность и точность обнаружения МБПЛА за счёт интеграции разнородных сенсоров и алгоритмов обработки данных;
- снизить вероятность ошибочной идентификации целей благодаря применению методов машинного обучения и когнитивного анализа;
- минимизировать риски для гражданских объектов и персонала за счёт избирательности воздействия и комбинированного применения РЭБ и кинетических средств;
- обеспечить рациональное использование технических и кадровых ресурсов через оптимизацию тактики противодействия и распределение задач;
- адаптировать систему противодействия под динамично меняющиеся условия и новые тактические приёмы противника.

Разработанная модель может служить методологической основой для формирования профессиональных стандартов и квалификационных требований к специалистам, проектирования учебных программ и курсов повышения квалификации, создания тренажёров и симуляционных комплексов для отработки навыков, а также модернизации существующих систем противовоздушной обороны и интеграции новых технологий.

Перспективным направлением дальнейшего развития модели является внедрение элементов искусственного интеллекта и машинного обучения для автоматизации процессов анализа данных, прогнозирования действий противника и поддержки принятия решений в режиме реального времени. Это позволит существенно повысить устойчивость системы противодействия МБПЛА к новым тактическим приёмам и технологическим решениям, используемым в современных беспилотных системах.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Патент № 2574224 С1 Российская Федерация, МПК G01S 17/06. Способ пассивного обнаружения и определения координат малогабаритных беспилотных летательных аппаратов : № 2014137917/28 : заявл. 18.09.2014 : опубл. 10.02.2016 / С. В. Шишков, А. И. Годунов, Д. В. Искоркин [и др.] ; заявитель

Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева". – EDN HLQXSJ.

2. Патент № 2601494 C1 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, G01S 5/00. Способ определения координат летательных аппаратов на основе использования двух дирекционных углов и одного угла места : № 2015114889/11 : заявл. 20.04.2015 : опубл. 10.11.2016 / Д. В. Искоркин, С. В. Шишков, А. В. Терешин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева". – EDN COYBQW.

3. Патент на полезную модель № 145279 U1 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, B64C 39/02. Устройство - истребитель малогабаритных беспилотных летательных аппаратов : № 2014107273/11 : заявл. 25.02.2014 : опубл. 20.09.2014 / С. В. Шишков ; заявитель Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева". – EDN JNHXG.

4. Патент на полезную модель № 72753 U1 Российская Федерация, МПК F41H 3/00. Устройство сетевой ловушки для борьбы с дистанционно пилотируемыми (беспилотными) летательными аппаратами : № 2007148485/22 : заявл. 24.12.2007 : опубл. 27.04.2008 / А. В. Пархоменко, Л. А. Молохина, А. И. Богомолов [и др.] ; заявитель Пензенский Артиллерийский Инженерный Институт. – EDN NYEWYL.

5. Патент № 2578722 C2 Российская Федерация, МПК F41H 3/00, F41H 13/00, F41G 7/26. Метод засветки оптико-электронных приборов малогабаритных беспилотных летательных аппаратов : № 2014107134/28 : заявл. 25.02.2014 : опубл. 27.03.2016 / С. В. Шишков ; заявитель Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева". – EDN LCKSAR.

6. Патент № 2572924 C2 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, G01S 5/20. Метод поражения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов : № 2014107133/11 : заявл. 25.02.2014 : опубл. 20.01.2016 / С. В. Шишков ; заявитель Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева". – EDN BPFZGQ.

7. Патент № 2559332 C1 Российская Федерация, МПК G01S 17/00. Метод обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов : № 2014107108/28 : заявл. 25.02.2014 : опубл. 10.08.2015 / С. В. Шишков ; заявитель Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева" Министерства обороны Российской Федерации. – EDN ZUDBK.7. ГОСТ Р 60.0.0.4 – 2019/ ISO 8373:2012. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 31с.

8. Патент № 2578524 C2 Российская Федерация, МПК F41H 11/02. Система управления комплексными методами борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами : № 2014107032/11 : заявл. 25.02.2014 : опубл. 27.03.2016 / С. В. Шишков ; заявитель Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева". – EDN QCHSEF.

9. Патент № 2523446 C2 Российская Федерация, МПК G01S 3/78. Способ автоматизированного определение координат беспилотных летательных аппаратов : № 2011147093/07 : заявл. 18.11.2011 : опубл. 20.07.2014 / С. В. Шишков ; заявитель Федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования военный учебно-научный центр сухопутных войск "Общевойсковая академия вооруженных сил российской федерации" (ОВА ВС РФ). – EDN PGDHFA.

10. Патент на полезную модель № 149412 U1 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, F41H 13/00. Малогабаритный роботизированный комплекс для борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами : № 2014107029/11 : заявл. 25.02.2014 : опубл. 27.12.2014 / С. В. Шишков ; заявитель Федеральное государственное казённое военное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева". – EDN WPSTXK.



УДК 378.146

**Прохоров<sup>1</sup> В.Ю., Евдокимов<sup>2</sup> Ю.М., Гладун<sup>3</sup> В.В.**

<sup>1</sup> Колледж современных технологий имени Героя Советского Союза М.Ф. Панова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Российская академия естественных наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

<sup>1,2,3</sup> prohorovv@yandex.ru

### **ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В КОЛЛЕДЖЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Аннотация.** Собран и обработан статистический материал, отражающий затраты времени, отведённого на самостоятельную работу по дисциплине «Техническая механика». Полученные результаты были уже частично использованы при переходе на новый учебный план, появились перспективы их использования в дальнейшей учебно-воспитательной работе.

**Ключевые слова:** студент, особенности обучения, техническая механика, сопротивление материалов, самостоятельная работа, затраты времени

**Prokhorov<sup>1</sup> V.Yu., Evdokimov<sup>2</sup> Yu.M., Gladun<sup>3</sup> V.V.**

<sup>1</sup> College advanced technologies of hero of the Soviet Union M.F. Panov, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

<sup>1,2,3</sup> prohorovv@yandex.ru

### **ORGANIZATION OF INDEPENDENT WORK OF STUDENTS IN COLLEGE ADVANCED TECHNOLOGIES**

**Abstract.** Statistical material was collected and processed, reflecting the time allotted for independent work in the discipline "Technical Mechanics". The results obtained have already been partially used in the transition to a new curriculum, there are prospects for their use in further educational work.

**Keywords:** student, peculiarities of training, technical mechanics, resistance of materials, independent work, time consumption

В колледже современных технологий (КСТ) самостоятельная работа организуется учебным отделом. Учебный отдел координирует планирование сроков выполнения занятий, лабораторных работ, проведение семинаров, деловых игр, контрольных работ благодаря специально разработанному графику. Для каждого студента КСТ уже в начале семестра известна последовательность выполнения учебной работы и формы контроля за ней. В этом графике приводится примерное время, необходимое для самостоятельной работы по каждой учебной дисциплине, которое было определено экспериментально в ходе проведения специального исследования. Для каждой дисциплины был получен коэффициент самостоятельной работы, равный отношению оптимального времени на самостоятельную работу по данной учебной дисциплине к объёму этой же дисциплины в часах по учебному плану. Таким образом, определилась трудоёмкость самостоятельной работы (в часах) по всем учебным дисциплинам, в том числе по технической механике.

Проблемы управления самостоятельной работой студентов давно вызывали интерес исследователей к структуре педагогического процесса в КСТ, а в настоящее время, в связи с усилением роли самостоятельной работы студентов, важность изучения этих проблем и их актуальность стала бесспорной. Вопросы самостоятельной работы студентов всегда находились в центре внимания коллектива преподавателей, в том числе и педагогов-кураторов колледжа.

В связи с переходом на обучение по новому учебному плану в КСТ перестраивается процесс обучения. Перед коллективом колледжа с особой остротой встала проблема изучения и совершенствования бюджета времени, отведённого на самостоятельную работу по преподаваемым дисциплинам. Острота этой проблемы объясняется прежде всего тем, что одна из дисциплин является фундаментальной (Техническая механика) – традиционно считается наиболее трудной при обучении не только в колледжах, но и в вузах технического профиля. На эти дисциплины опираются многие из дисциплин, преподаваемых в КСК. Пути совершенствования преподавания привели к использованию новейших и эффективных средств и приёмов преподавания. Широко используются приёмы и методы проблемного метода обучения, все виды ТСО, включая компьютерный зал [1-5]. Однако, оптимизация использования и экономия учебного времени имеет естественные пределы: практически на каждом практическом занятии разбираются новые темы, без которых: а) нельзя продвигаться при изучении данного предмета и б) на каждую из рассматриваемых тем так или иначе опираются специальные дисциплины. Наконец, сами по себе разбираемые понятия трудны для усвоения, их невозможно запомнить и понять механически, к ним необходимо возвращаться не

один раз для того, чтобы осознанно пользоваться ими. Всё это требует затрат времени, которого в рамках учебного расписания, уже не остаётся. Поэтому для полного усвоения разделов дисциплин остаётся единственный путь – самостоятельные занятия. Именно поэтому исследование бюджета времени, отведённого на самостоятельные занятия, совершенствование управления этим процессом является тем путём, на котором необходимо искать решение задач совершенствования учебного процесса, а в итоге – улучшение качества подготовки специалистов, имеющих специальное образование в области строительства и эксплуатации зданий и сооружений, а также сварочных работ.

КСТ не один год ведёт исследования по изучению и совершенствованию бюджета учебного времени. Велась работа по изучению трудозатрат на самостоятельную работу студентов-заочников по технической механике. Настоящее исследование преследует цель изучить, проанализировать и изыскать возможности для оптимизации бюджета времени студентов, отводимого для самостоятельной работы по дисциплине.

Существует два вида самостоятельной работы студентов – работа в аудитории под контролем преподавателей и работа внеаудиторная при изучении дисциплины и во время выполнения домашних заданий. Первый вид работы возник недавно и практикуется в КСТ при изучении дисциплин физики и математики. По вышеизложенным причинам этот вид самостоятельной работы является малопривлекательным и настоящее исследование посвящено, в основном, исследованию бюджета времени самостоятельной внеаудиторной работы слушателей.

При проведении настоящего исследования в учебных группах изучены затраты времени на решение задач, домашних заданий по дисциплине техническая механика. Каждому студенту была выдана специально разработанная анкета, где он должен был проставить количество времени, затраченное им на решение каждой контрольной работы. По окончании сбора материала была проведена статистическая обработка данных и на её основании было продолжено более подробное исследование затрат времени на выполнение отдельных этапов при решении каждой задачи. После выполнения исследований выявились вопросы, вызывающие наибольшие затруднения при понимании материала, излагаемого в дисциплине, изучение которых требует большого объёма учебного времени и более тщательного контроля со стороны преподавателя.

Закключение. Изучение бюджета времени студентов носит специфический характер. Оно необходимо прежде всего для выявления состояния и совершенствования организации учебного процесса в колледжах в целом, для упорядочения режима учёбы студентов и организации их свободного времени. Изучение бюджета времени представляется необходимым для разработки модели всего бюджета времени. Эта модель должна быть своеобразным эталоном, который может быть положен в основу перспективного планирования учебного и свободного времени студента. Такая модель (а лучше сказать – модели, учитывающие специфику подготовки отдельных специалистов) могла бы стать научно-обоснованным ориентиром для достижения рационального использования времени студентов. Сравнение фактического бюджета времени студентов с его моделью позволило бы определить степень рациональности использования фонда времени студента, эффективность мероприятий по его экономии и дальнейшему совершенствованию.

К сожалению, вопросы моделирования бюджета времени, судя по литературе, разработаны менее других. Это объясняется проблемами (общесоциологическими), встающими перед исследователем при создании такой модели. Среди них важнейшими являются следующие:

1. Каковы должны быть продолжительность и структура дневного и годового фонда учебного времени студента и соотношение в нём аудиторных и внеаудиторных учебных занятий, каковы должны быть нормы домашних заданий по каждому предмету и т.д.

2. Какова должна быть величина и структура свободного времени студентов.

3. Каково должно быть соотношение физических и умственных занятий студентов различных курсов.

4. Какова должна быть величина и структура времени, расходуемого на общественную работу.

5. Каковы научные принципы, которые должны использоваться при разработке учебного плана и расписания занятий студентов.

Названные вопросы далеко не исчерпывают всего круга проблем. Однако, несмотря на указанные трудности, вопрос создания модели бюджета времени студента является, по нашему мнению, центральным во всей проблеме.

Весьма важно также при изучении фактического бюджета времени студентов использовать совершенную методику. Тем более, что подобным изучением в последние

годы начинает заниматься всё более широкое число работников учебных заведений. В литературе отмечают следующие типичные ошибки некоторых исследователей:

1. Отсутствие разработанной программы исследований, чётко сформулированных его задач.

2. Отсутствие продуманной выборки лиц обследования и периодов времени их опроса.

3. Неправильное ведение записи затрат времени (по фиксированным и записанным заранее в бланке видам деятельности и т.д.).

4. Название техники обработки и анализа статистических данных и т.д.

Реформа высшего и среднего специального образования в РФ ставит задачи совершенствования учебно-воспитательного процесса, повышения качества подготовки и уровня квалификации специалистов. Оптимизация бюджета времени студентов – одно из условий выполнения этих задач.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Прохоров, В.Ю. STORITELLING как современная стратегия преподавания / В.Ю. Прохоров, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2019. № 2. С. 149-151.

2. Прохоров, В.Ю. Помощник в образовательном процессе среднего профессионального обучения / В.Ю. Прохоров, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2018. № 1. С. 315-317.

3. Прохоров, В.Ю. Воспитательная работа с молодежью в организациях среднего профессионального образования. Тренинг как метод активного обучения / В.Ю. Прохоров, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 238-240.

4. Прохоров, В.Ю. Психолого-педагогическое сопровождение духовно-нравственного развития будущего специалиста / В.Ю. Прохоров, Ф.М. Осипов, И.А. Макарова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2025. Т. 1. С. 426-431.

5. Токарева О.В., Прохоров В.Ю., Фролов С.В. Межпредметные связи в процессе преподавания учебных дисциплин «Инженерная графика», «Прикладная механика. Материаловедение и технология материалов» / О.В. Токарева, В.Ю. Прохоров, С.В.Фролов // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2025. Т. 1. С. 329-331.

УДК 618.1

**Терехин<sup>1</sup> Д.Н., Трусов<sup>2</sup> А.В.**

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## **УМНЫЙ ДОМ В АКВАРИУМЕ: АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОНИТОРИНГ АКВАРИУМНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ**

**Аннотация.** Рассматривается концепция умного аквариума как специализированной системы автоматизации, адаптирующей технологии умного дома к задачам поддержания оптимальной среды для гидробионтов. Описаны ключевые компоненты системы, алгоритмы контроля параметров водной среды, преимущества внедрения цифровых решений в аквариумистику. Особое внимание уделено вопросам интеграции сенсоров, контроллеров и программного обеспечения для стабильного функционирования замкнутой экосистемы.

**Ключевые слова:** умный аквариум, автоматизация аквариумистики, мониторинг водной среды, IoT-аквариумистика, биотехнические системы, датчики параметров воды, контроллер аквариума

**Terekhin<sup>1</sup> D.N., Trusov<sup>2</sup> A.V.**

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> kipra@pnzgu.ru

## **AQUARIUM SMART HOME: AQUARIUM ECOSYSTEM AUTOMATION AND MONITORING**

**Abstract.** The concept of "smart aquarium" is considered as a specialized automation system that adapts smart home technologies to the tasks of maintaining an optimal environment for hydro-bionts. The key components of the system, algorithms for monitoring the parameters of the aquatic environment, the advantages of introducing digital solutions into aquarium science are described. Particular attention is paid to the integration of sensors, controllers and software to ensure the stable functioning of a closed ecosystem.

**Keywords:** smart aquarium, aquarium automation, water environment monitoring, IoT aquarium, biotechnical systems, water parameters sensors, aquarium controller

### **1. Введение**

Аквариум представляет собой сложную замкнутую экосистему, требующую постоянного контроля физико-химических параметров воды (температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал, концентрация растворённого кислорода и др.). Традиционное обслуживание предполагает регулярные ручные замеры и корректировки, что сопряжено с:

высокой трудоёмкостью;

риском человеческих ошибок;

задержками в реагировании на критические изменения.

Концепция «умного аквариума» предполагает внедрение автоматизированных систем мониторинга и управления, аналогичных решениям «умного дома», но адаптированных к специфике водной среды. Цель исследования – анализ возможностей, архитектуры и перспектив таких систем.

### **2. Архитектура системы**

Типовая система «умный аквариум» включает три уровня:

Сенсорный уровень – датчики для измерения ключевых параметров:

температура ( $T$ , °C);

pH (pH);

окислительно-восстановительный потенциал (ORP, мВ);

концентрация растворённого кислорода (DO, мг/л);

уровень воды ( $H$ , см);

прозрачность/мутность (NTU).

Управляющий уровень – микроконтроллер (например, Arduino, Raspberry Pi) с алгоритмами:

сбора данных с периодичностью  $\Delta t$  (от 1 мин);

сравнения с заданными диапазонами ( $T_{min} \leq T \leq T_{max}$ );

активации исполнительных устройств при выходе за пределы.

Интерфейс пользователя – мобильное приложение или веб-панель для:

визуализации данных в реальном времени;

настройки пороговых значений;

получения уведомлений о нештатных ситуациях.

### **3. Ключевые подсистемы автоматизации**

#### **3.1. Терморегуляция**

Датчики температуры передают данные на контроллер.

При  $T < T_{set} - \Delta T$  включается нагреватель.

При  $T > T_{set} + \Delta T$  активируется охлаждение (вентилятор, чиллер).

Пример датчика температуры:

**ТЕРМОСТАТ ДЛЯ АКВАРИУМА**

Терморегулятор предназначен для поддержания заданной температуры в небольшом аквариуме. Характерная особенность термостата в использовании в качестве подогревающего элемента батареи из десяти параллельно соединённых двухваттных

резисторов, подключаемых к электросети. Расположив резисторы на подставке под аквариум можно достигнуть равномерного прогрева его со стороны дна.

Датчиком температуры служит терморезистор R1, помещенный в пробирку с песком, которая погружена в воду в аквариуме (так чтобы вода не попадала внутрь пробирки).

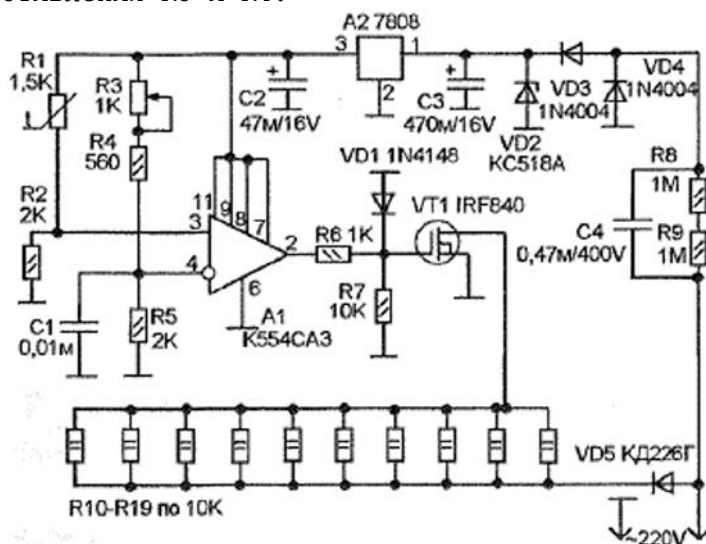
В основе схемы компаратор K554CA3. На его прямой вход поступает напряжение от делителя, состоящего из терморезистора R1 и постоянного резистора R2. Второй вход, - инверсный, служит для установки температуры, которую нужно поддерживать. Здесь имеется регулируемый делитель напряжения, состоящий из переменного резистора R3 и резисторов R4 и R5. Эти резисторы (входящие в состав обоих делителей) образуют термочувствительный мост. При изменении температуры за счет изменения сопротивления терморезистора происходит разбалансировка моста, и напряжение ошибки выделяется между входами компаратора. В зависимости от полярности этого напряжения изменяется состояние выхода компаратора. Происходит это таким образом, что бы при снижении температуры относительно точки баланса моста нагреватель включался, а при повышении температуры относительно точки баланса моста, - выключался.

У микросхемы K554CA3 есть два выхода. Вернее, её выходной транзистор выведен эмиттером (выв. 2) и коллектором (выв. 9). В данной схеме для управления полевым транзистором VT1 требуется положительное напряжение, поэтому, коллекторный вывод (вывод 9) подключен к плюсу источника питания А напряжение для управления полевым транзистором снимается с эмиттерного вывода. Таким образом, резисторы R6 и R7 являются нагрузкой выходного каскада А1.

Для включения резисторного нагревателя используется полевой ключевой транзистор VT1 типа IRF840. На настоящий момент это оптимальный вариант для управления маломощной нагрузкой питающейся от сети переменного тока. Диод VD1 служит для разряда емкости затвора транзистора. Практически мощность нагрузки (нагревателя из резисторов) при указанных на схеме номиналах резисторов составляет около 40W. На каждый резистор R10-R19 приходится примерно по 4W что вдвое больше номинальной мощности. В результате резисторы нагреваются и нагревают окружающую среду.

Источник питания терморегулятора - бестрансформаторный. Избыток переменного напряжения гасится реактивным сопротивлением конденсатора C4. Диоды VD4-VD4 выпрямляют напряжение. Стабилитрон VD2 его ограничивает, а стабилизирует его интегральный стабилизатор A2.

При налаживании можно изменить пределы регулировки температуры подбором сопротивления R5 и R4.



### 3.2. Контроль качества воды

pH-датчик инициирует дозирование реагентов (кислота/щёлочь) через перистальтический насос.

Датчик DO управляет аэратором для поддержания  $DO \geq 5$  мг/л.

ORP-сенсор сигнализирует о необходимости частичной замены воды.

### 3.3. Освещение

Светодиодные лампы с регулируемой интенсивностью и спектром.

Расписание включения/выключения по фотопериоду (например, 12 ч света / 12 ч темноты).

Имитация рассвета/заката (плавное изменение яркости за 30 мин).

### 3.4. Фильтрация и циркуляция

Контроль засорения фильтра по перепаду давления.

Автоматическое включение резервного насоса при отказе основного.

Пример нескольких датчиков в одной системе:



Отслеживайте температуру, ОВП и pH с помощью входящих в комплект лабораторных датчиков с двойным соединением. Непрерывный мониторинг уровня воды с помощью нового датчика уровня жидкости Надежный и многоразовый новый оптический мультиповерхностный датчик обнаружения утечек Устанавливайте напоминания, записывайте информацию о тестировании и дозировании и получайте доступ к своему резервуару из любого места с помощью Apex Fusion.



### 4. Алгоритмы принятия решений

Система использует логические правила вида:

ЕСЛИ ( $T > T_{max}$ ) ТО включить охлаждение,

а также элементы машинного обучения для:

прогнозирования «цветения» воды по динамике мутности;

адаптации графика кормления к биоритмам рыб;

выявления аномалий (например, резкое падение pH из-за разложения органики).

### 5. Преимущества внедрения

Стабильность параметров: отклонение от заданных значений не более  $\pm 5\%$ .

Снижение трудозатрат: автоматизация до **90%** рутинных операций.

Раннее предупреждение: уведомления при угрозе гипоксии или перегрева.

Дистанционный контроль: мониторинг через интернет из любой точки мира.

Архив данных: анализ трендов для оптимизации условий содержания.

### 6. Технические ограничения и вызовы

Калибровка датчиков: необходимость регулярной поверки (каждые 1–3 месяца).

Энергозависимость: риск сбоев при отключении питания (требуется ИБП).

Стоимость: начальная комплектация — от 300 до 1000 USD.

Совместимость: отсутствие единого стандарта для аквариумных IoT-устройств.

7. Перспективы развития

Интеграция с «умным домом» (например, отключение аквариума при протечке).

Использование ИИ для диагностики заболеваний рыб по видеоанализу.

Разработка биосенсоров для контроля концентрации нитратов/фосфатов.

Создание облачных платформ для обмена данными между аквариумистами.

Пример умного аквариума:

8. Заключение

«Умный аквариум» — это перспективное направление автоматизации, позволяющее минимизировать человеческий фактор в поддержании экосистемы;

повысить выживаемость гидробионтов;

снизить эксплуатационные расходы.

Дальнейшее развитие технологий IoT и искусственного интеллекта откроет новые возможности для создания самонастраивающихся аквариумных систем, приближённых к идеальным замкнутым биоциклам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith J. et al. Smart Aquaculture Systems: A Review // Aquacultural Engineering. 2023. Vol. 45. P. 112–125.
2. Иванов А.В. Автоматизация аквариумных экосистем: принципы и технологии. М.: Аква-Пресс, 2022.
3. Lee H., Kim S. IoT-Based Water Quality Monitoring for Aquariums // Sensors. 2024. Vol. 14. № 3. P. 44–58.
4. ГОСТ Р 58466-2019. Системы мониторинга водной среды. Общие требования.
5. Zhang L. et al. Machine Learning in Aquarium Management: Case Studies // IEEE Transactions on Smart Environments. 2023. P. 201–215.
6. Кособоков А.С., Затылкин А.В., Юрков Н.К. Автоматизированная система управления микроклиматом в аквариуме // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2014.
7. Горячев Н.В. Тепловая модель сменного блока исследуемого объекта // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». 2012. Т. 1. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2012. С. 263.
8. Затылкин А.В., Кочегаров И.И., Юрков Н.К. Алгоритм проведения проектных исследований радиотехнических устройств опытно-теоретическим методом // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». 2012.
9. Плоский В.Д. Полное руководство аквариумиста. М.: Аквариум, 2002.
10. Плоский В.Д. Современное аквариумное оборудование. М.: Аквариум-Принт, 2006.
11. Русаков А.Г. Аквариум — это просто. М.: Аквариум-Принт, 2008.
12. Махлин М.Д. Занимательный аквариум. М.: Пищевая промышленность, 1967.
13. Золотницкий Н.Ф. Аквариум любителя. М.: Терра, 1993.
14. Полканов Ф. Подводный мир в комнате. М.: Детская литература, 1970.
15. Акимускин И.И. Причуды природы. М.: Москва, 1992.
16. Кочетов А.М. Декоративное рыбоводство. М.: Просвещение, 1991.
17. Encyclopedia of Aquariums: Fish, Plants, and Equipment / Ed. by R. Thompson. London: Firefly Books, 2021.
18. Brown L.J., Wilson K.R. Smart Sensors for Aquatic Environments: Design and Applications. New York: Springer, 2022.
19. Wang Y., Chen Z. AI-Driven Aquarium Ecosystem Management: From Data Collection to Decision Making // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 195. P. 107892.
20. Фёдоров В.А., Соколова Е.Н. Биотехнические системы мониторинга водных экосистем // Приборостроение и автоматизация. 2021. № 4. С. 45–52.

УДК 378.1

**Савицкий<sup>1</sup> В.Я., Григорян<sup>2</sup> Е.С.**

<sup>1,2</sup> Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

<sup>1</sup> w.savis@gmail.com

<sup>2</sup> esgrigoryan@inbox.ru

### **ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ МОТИВАЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ КУРСАНТОВ В ВОЕННОМ ВУЗЕ В УСЛОВИЯХ ГЕОПОЛИТИЧЕСКИХ ВЫЗОВОВ**

**Аннотация.** В условиях современных геополитических вызовов мотивация молодежи к получению военного образования является первостепенной задачей. Представлены результаты исследования основных мотивов поступления в военный вуз, мотивов выбора филиала ВА МТО (г. Пенза), мотивации к дальнейшему прохождению военной службы. Разработана мотивационная модель подготовки выпускника по военной специальности «Эксплуатация ракетно-артиллерийского вооружения». Обоснована роль научно-исследовательской деятельности в реализации разработанной модели мотивационного обучения.

**Ключевые слова:** военный вуз, мотивация, мотивационное обучение, научно-исследовательская деятельность, геополитические вызовы

UDC 378.1

**Savitsky<sup>1</sup> V.Ya., Grigoryan<sup>2</sup> E.S.**

<sup>1,2</sup> Branch of the Military Academy of Logistic Support named after General of the Army A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

<sup>1</sup> w.savis@gmail.com

<sup>2</sup> esgrigoryan@inbox.ru

### **FORMATION OF A MOTIVATIONAL LEARNING MODEL OF CADETS AT A MILITARY UNIVERSITY IN THE CONDITIONS OF GEOPOLITICAL CHALLENGES**

**Abstract.** In the context of modern geopolitical challenges, motivating young people to receive military education is a primary task. The results of the study of the main motives for entering a military university, the motives for choosing a branch of VA MTO (Penza), motivation for further military service are presented. A motivational model for training a graduate in the military specialty «Operation of missile and artillery weapons» has been developed. The role of research activities in the implementation of the developed model of motivational training is substantiated.

**Keywords:** military university, motivation, motivational training, scientific research activities, geopolitical challenges

#### **Введение**

На заседании экспертного совета по вопросам модернизации системы военного образования и подготовки офицерских кадров, состоявшемся 07.07.2025 г., министр обороны России Андрей Белоусов заявил, что «главное в сфере военного образования – повышение престижа военной службы» [1].

**Однако в условиях современных геополитических вызовов возникают проблемы демотивированности к военному образованию. Анализ нормативно-правовой базы (Федеральный закон от 28.03.1998 №53-ФЗ (ред. от 28.12.2025) «О воинской обязанности и военной службе» [2], Федеральный закон от 27.05.1998 №76-ФЗ (ред. от 15.12.2025) «О статусе военнослужащих» [3], Приказ Министра обороны РФ от 30 мая 2022 г. (с изм. на 14.02.2026) №308 «Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации» [4] и др.) позволил выявить следующие обстоятельства, приведенные на рис. 1.**

На наш взгляд, возникновение подобных мыслей в сознании курсанта недопустимо, так как военнослужащий должен быть патриотичным, преданным и готовым к защите Отечества. Противостоять данному влиянию можно путем формирования эффективной мотивационной модели обучения в военном вузе, которая должна «блокировать» внешние негативные факторы и побуждать будущего офицера к добросовестному исполнению своих обязанностей.

В условиях проведения Специальной военной операции (СВО) проблема поддержания высокой боевой готовности имеет тесную связь с системой мотивации к военной службе курсантов – будущих офицеров. Как отмечает И.А. Алехин, «именно мотивация обеспечивает побуждение военнослужащего к исполнению служебных обязанностей, решению задач по предназначению, определяет стремление к профессиональному становлению» [5].

Современные требования к офицерским кадрам также определяют необходимость поиска решений по повышению качества профессиональной подготовки курсантов военного вуза. Одним из важных условий решения этой задачи является формирование у курсантов мотивации к военной профессиональной деятельности, оказывающей значительное влияние на эффективность их обучения и воспитания, профессиональную подготовку и службу.



Таким образом, необходимость формирования мотивационной модели обучения курсантов военных вузов обусловлена объективной потребностью общества в квалифицированных, профессионально подготовленных офицерах, способных по своим деловым, моральным и физическим качествам эффективно решать задачи обеспечения национальной безопасности.

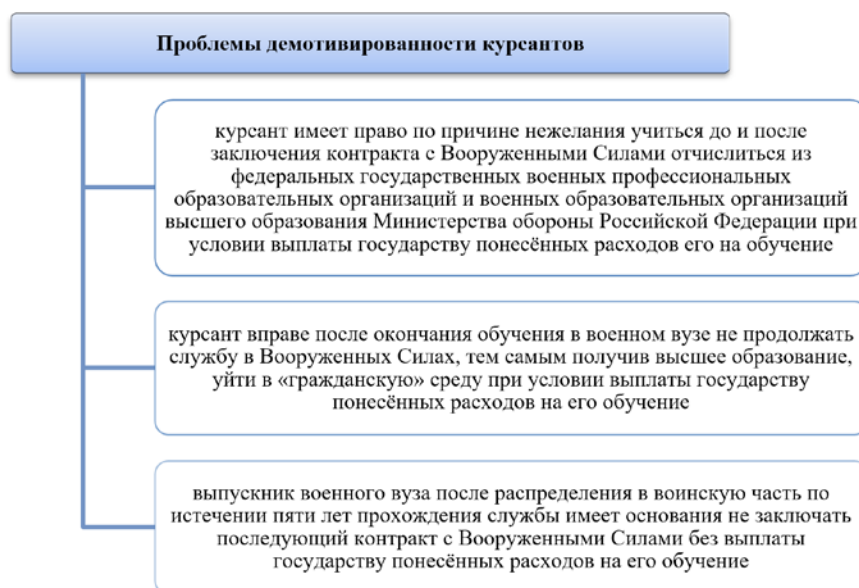


**Рисунок 1 – Проблемы демотивированности курсантов**

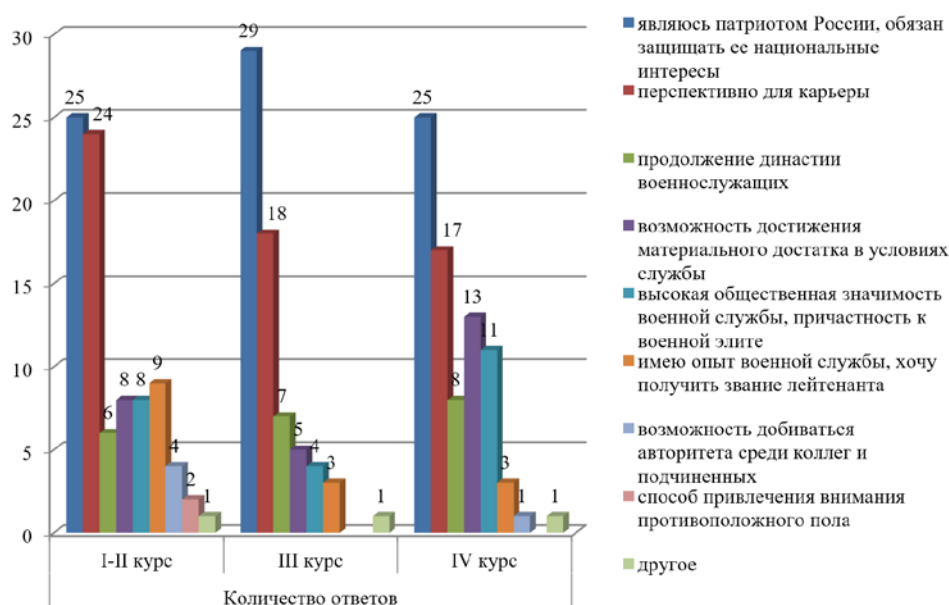


**Рисунок 2 – Мотивы поступления в военный вуз, чел.**

В этой связи, авторами проведено исследование, направленное на выявление основных мотивов поступления в военный вуз, определение мотивов выбора филиала ВА МТО (г. Пенза), определение отношения к военной службе.

1. Результаты исследования мотивации к получению военного образования

Мотивация выбора военного вуза может зависеть от различных факторов, таких как престиж военной профессии, социальное положение родителей, семейные традиции и субъективные характеристики (рис. 2).

16 % опрошенных выбрали ПАИИ потому, что в нем обучались или обучаются в настоящее время их знакомые или родственники. Доступность обучения отметили 9 % опрошенных курсантов, не прошедших по конкурсу в другие военные и гражданские вузы. Почти половина опрошенных курсантов (43 %) отмечают, что при выборе военного вуза на них повлияло мнение родителей и знакомых (рис. 3).

Среди тех, кого в военный вуз привлекло материальное положение, чаще других отмечается влияние родителей (45,5 %). Однако особенно сильным это влияние проявилось у тех, для кого военная профессия – дань традициям семьи (57 %) и дань послушанию родителям (100 %).

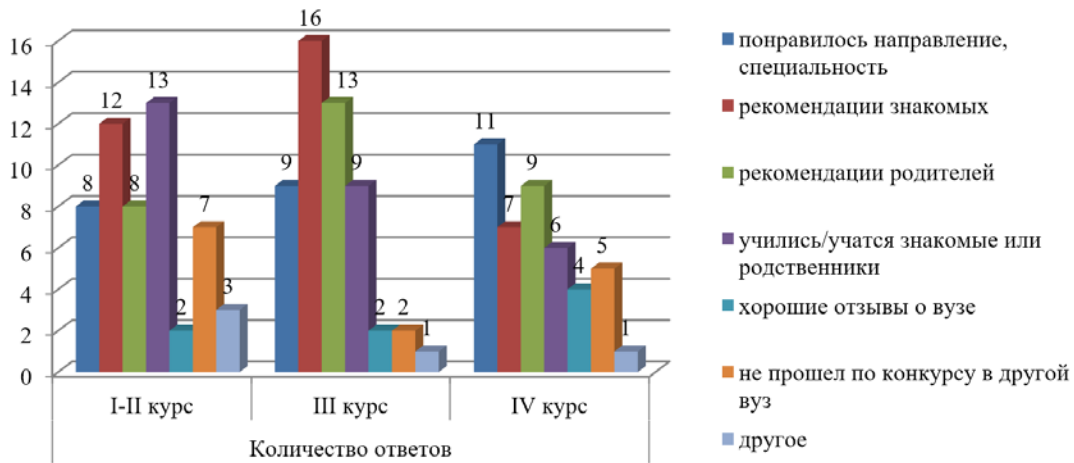


**Рисунок 3** – Мотивы выбора филиала ВА МТО (г. Пенза), чел.

## 2. Результаты исследования мотивации к прохождению военной службы

У большей части четверокурсников доминируют оптимистические взгляды на будущую офицерскую службу. С ней они связывают надежды на лучшую жизнь (58 %), уверенность в своих силах (42 %), заинтересованность в перспективах военной службы (50%), спокойствие (27 %).

Так, 89 % опрошенных курсантов полагают, что знания и навыки, полученные во время учебы, позволяют полностью (25 %) или частично (64 %) выполнять служебные обязанности. Более четверти опрошенных (26 %) готовы служить там, где прикажут. Почти половина опрошенных будущих офицеров (47 %) не боятся начинать свою воинскую карьеру с должности в первичном звене.

## 3. Рекомендуемая модель мотивационного обучения курсантов военного вуза

Организация учебного процесса по формированию будущих офицеров хотя и способствует их подготовке, но должна быть более целенаправленная и эффективна. Взаимосвязь условий и факторов, побуждающих курсантов к достижениям, позволила разработать многоуровневую мотивационную модель подготовки выпускника по военной специальности «Эксплуатация ракетно-артиллерийского вооружения» (рис. 4).

Важным аспектом данной модели в контексте повышения качества профессиональной подготовки курсантов является их активное участие в научно-исследовательской деятельности. Обусловлено это тем, что «служба в вооруженных силах немыслима без применения современного вооружения и технических средств, без учета новейших научных достижений в области военнoproфессиональной деятельности, поэтому необходимым условием для полноценной подготовки современного военного специалиста является формирование навыков обоснованного выбора применяемых образцов вооружения и технических средств, учета и использования достижений науки в военной сфере» [6].

Требования ФГОС ВО указывают, что курсант военного вуза должен обладать способностью «анализировать текущее состояние, понимать тенденции развития стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия; применять методы научных исследований, работать с научно-технической литературой и электронными средствами доступа и хранения информации специального характера при разработке образцов стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия» [7].

В рамках предлагаемой модели целесообразно организовать тандем «первокурсник – выпускник» на основе и общих научных и учебных интересов. Система взаимодействия «первокурсник – выпускник» очень эффективна и полезна и той и другой стороне, так как выпускник (курсант-наставник) получает заинтересованного помощника, а первокурсник «вводится» в будущую профессию на ранней стадии, что обеспечивает лучшее понимание им актуальности, важности и направленности проблематики дипломного проектирования.

**Курсант-наставник** – это курсант старшего курса (например, четвертого), который помогает первокурсникам адаптироваться в учебной и научной среде. В его обязанности может входить:

помощь первокурсникам в строевых подготовках, организационных и бытовых вопросах;

контроль учебной успеваемости и дисциплины;

совместное военно-научное творчество;

ознакомление с воинским уставом;

психологическая поддержка подопечного и др.

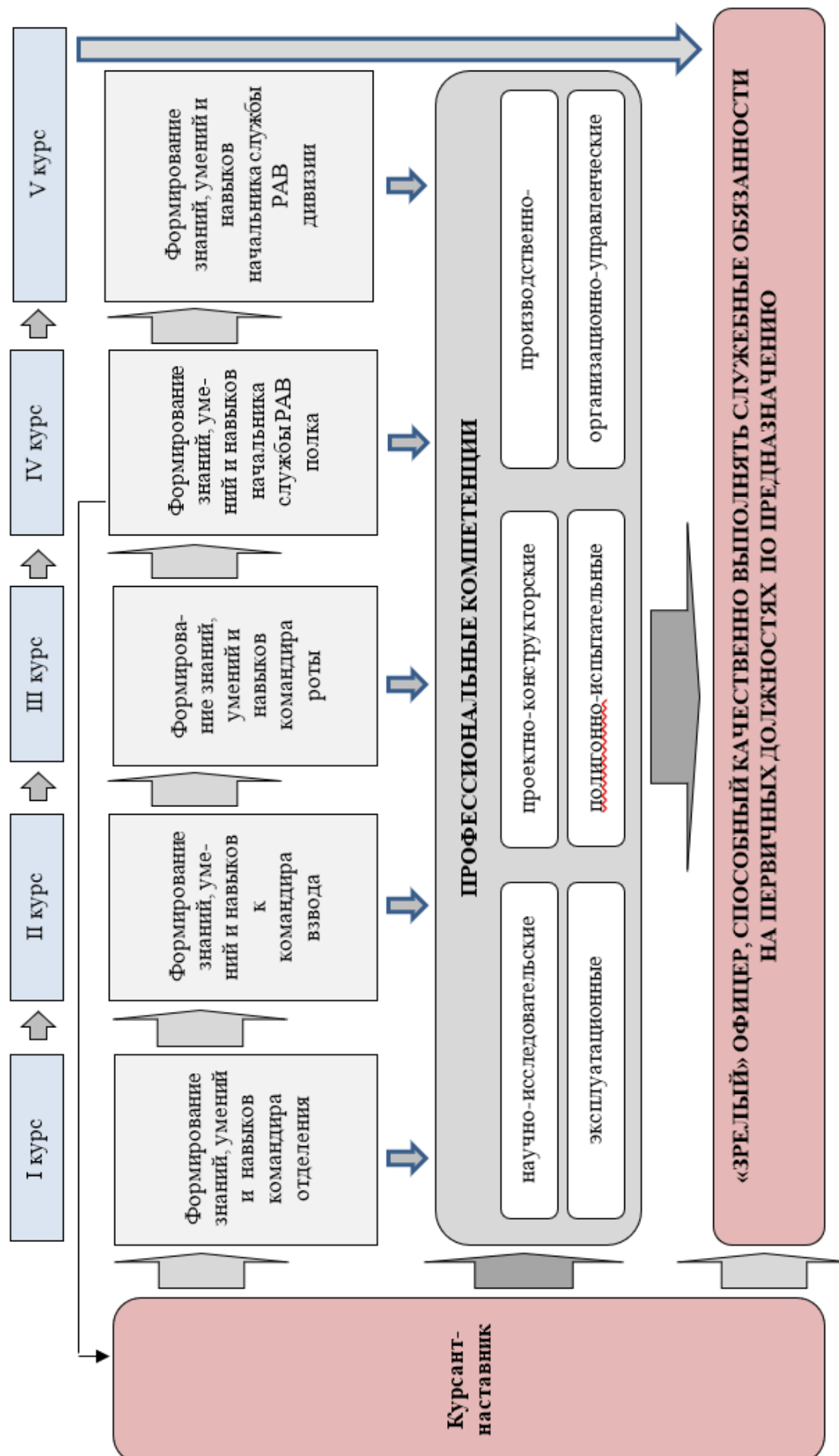


Рисунок 4 – Мотивационная модель подготовки выпускника по военной специальности «Эксплуатация ракетно-артиллерийского вооружения»

Работая с группой первокурсников, курсант-наставник приобретает опыт руководства воинским коллективом. Курсант-наставник должен обладать активной жизненной позицией, хорошей учёбой и личной дисциплиной.

В дальнейшем, первокурсник будет более мотивирован на успешное освоение военной профессии. Для выпускников данный tandem является дополнительной управленческой практикой, ведь они должны правильно организовать, провести и оценить работу первокурсников, привлечь их к работе в научных кружках.

Заключение

Перспективы внедрения модели мотивационного обучения:

личностный рост и развитие профессиональных компетенций курсантов старших курсов;

социализация и адаптация курсантов первого курса, а также повышение качества их взаимодействия с педагогами, сослуживцами, руководящим составом вуза;

повышение успеваемости курсантов, их мотивации к учебе и научной работе.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Белоусов: главное в сфере военного образования – повышать престиж службы. / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tvzvezda.ru/news/2025771518-tm7ZL.html> (дата обращения: 05.04.2026 г.)
2. Федеральный закон от 28.03.1998 №53-ФЗ (ред. от 28.12.2025) «О воинской обязанности и военной службе». / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901704754> (дата обращения: 20.03.2026 г.)
3. Федеральный закон от 27.05.1998 №76-ФЗ (ред. от 15.12.2025) «О статусе военнослужащих». / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901709264> (дата обращения: 20.03.2026 г.)
4. Приказ Министра обороны РФ от 30 мая 2022 г. (с изм. на 14.02.2026) №308 «Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации». / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/350962863> (дата обращения: 20.03.2026 г.)
5. Алехин И.А. Развитие теории и практики военного образования в России XVIII-начала XX века. / Диссертация на соискание ученой степени доктора педагогических наук. – Москва, 2004. – 636 с.
6. Бабухин М.А. Формирование готовности курсантов военного вуза к исследовательской деятельности. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата педагогических наук. – Н. Новгород. – 2022 г. – 26 с.
7. Приказ Минобрнауки России от 18.08.2020 № 1053 (ред. от 27.02.2023) «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – специалитет по специальности 17.05.02 Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://voenmeh.ru/wp-content/uploads/2024/07/17.05.02-fgos-3.pdf> (дата обращения: 20.04.2026)

УДК 658.71, 004.9, 004.6

**Чеплакова<sup>1</sup> Е.Ю., Гордеева<sup>2</sup> О.А., Кудрина<sup>3</sup> М.А.**

<sup>1,2,3</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

<sup>1</sup> [euchep@mail.ru](mailto:euchep@mail.ru)

<sup>2</sup> [gordeeva.aa@ssau.ru](mailto:gordeeva.aa@ssau.ru)

<sup>3</sup> [maria\\_kovr@mail.ru](mailto:maria_kovr@mail.ru)

## **ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕКСИЧЕСКИХ ПОВТОРОВ, ТАВТОЛОГИЙ И ПЛЕОНАЗМОВ В ТЕКСТЕ**

**Аннотация.** Представлен алгоритм поэтапного определения стилистических и речевых избыточностей текста. Задача поиска подобных речевых ошибок особенно актуальна для научных публикаций, учебных материалов, деловой переписки. Подход основан на поэтапном обнаружении избыточностей разного вида. Предложенный алгоритм реализован и исследован с помощью разработанной автоматизированной системы.

**Ключевые слова:** речевая избыточность, плеоназм, тавтология, лексический повтор, классификация, логистическая регрессия, коэффициент Жаккара, расстояние Джаро – Винклера, лемматизация, семантическое сходство, автоматизированная система

***Cheplakova<sup>1</sup> E.Yu., Gordeeva<sup>2</sup> O.A., Kudryna<sup>3</sup> M.A.***

<sup>1,2,3</sup> Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia

<sup>1</sup> [euchep@mail.ru](mailto:euchep@mail.ru)

<sup>2</sup> [gordeeva.aa@ssau.ru](mailto:gordeeva.aa@ssau.ru)

<sup>3</sup> [maria\\_kovr@mail.ru](mailto:maria_kovr@mail.ru)

## **A HYBRID APPROACH FOR IDENTIFYING LEXICAL REPETITIONS, TAUTOLOGIES, AND PLEONASMS IN TEXT**

**Abstract.** The algorithm for the step-by-step detection of stylistic and speech redundancies in text is presented. The task of detecting such speech errors is particularly relevant for scientific publications, educational materials, and business correspondence. The algorithm is based on the step-by-step detection of various types of redundancies. The proposed algorithm is implemented and tested using the developed automated system.

**Keywords:** speech redundancy, pleonasm, tautology, lexical repetition, classification, logistic regression, Jaccard coefficient, Jaro – Winkler distance, lemmatization, semantic similarity, automated system

### **ВВЕДЕНИЕ**

В условиях непрерывного увеличения объема цифровой текстовой информации возрастает потребность в инструментах автоматического контроля качества текстов. Деловая переписка, научные публикации, юридические документы, учебные материалы, интернет-контент и рекламные тексты требуют не только грамматической корректности, но и стилистической точности, ясности и отсутствия речевой избыточности. Одной из наиболее распространенных проблем являются лексические повторы, тавтологии и плеоназмы, ухудшающие восприятие текста, снижающие его выразительность и затрудняющие понимание содержания.

Ручной поиск подобных ошибок требует значительных временных затрат и зависит от уровня подготовки автора или редактора. При работе с большими объемами текста такой подход становится недостаточно эффективным. Автоматизация процесса обнаружения речевых избыточностей позволяет существенно сократить время анализа и повысить объективность оценки текста.

Несмотря на наличие встроенных средств проверки орфографии и грамматики в текстовых редакторах и развитие генеративных языковых моделей, задача обнаружения речевых избыточностей решена не полностью [1]. Универсальные инструменты ориентированы в основном на поиск орфографических, пунктуационных и грамматических ошибок, а анализ более сложных стилистических явлений, связанных с повторем слов, морфемной структурой и семантическим дублированием, сильно затруднен.

Генеративные языковые модели также не заменяют профильные инструменты анализа текста. Они, в первую очередь, преобразуют текст, а не обнаруживают речевую избыточность, причём зачастую не могут указать на ошибки точно, не изменяя исходного смысла. Их ответы недетерминированы – один и тот же запрос при повторной обработке может дать разные исправления [2].

Согласно рейтингу Lmarena, опубликованному в 2025 году, модель GPT-5-chat оказалась слабее GPT-4o в многоэтапных диалогах, создании текстов, программировании и обработке длинных запросов. Исследование показало существенное отставание GPT-5-chat по русскому языку: 1418 баллов против 1441 у GPT-4o [3].

К тому же, использование облачных сервисов не всегда допустимо для юридических, корпоративных и научных документов из соображений конфиденциальности.

Таким образом, существует потребность в специализированном инструменте, предназначенном для обнаружения лексических повторов, тавтологий и плеоназмов в русскоязычных текстах. Разрабатываемая автоматизированная система ориентирована

на решение данной задачи за счёт гибридного подхода, основанного на комплексном применении нескольких подходов – выявлении лексических повторов независимо от их позиции в предложении, анализе однокоренных слов с использованием character-CNN и определении плеоназмов на основе семантической модели SBERT, обученной на русскоязычных данных.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧА

##### Базовые подходы и их ограничения.

В задачах классификации текста в качестве базовых моделей обычно используются методы на основе Bag-of-Words и TF-IDF в сочетании с линейными классификаторами – логистической регрессией, SVM или наивным байесовским классификатором. Для поиска лексических повторов и тавтологий применяются такие меры сходства как коэффициент Жаккара, расстояние Джаро-Винклера, коэффициент Сёренсена-Дайса и косинусное сходство между эмбедингами. Однако каждый из этих подходов обнаруживает речевую избыточность лишь частично. Методы, основанные на формальном сходстве строк, способны выявлять однокоренные слова, но не учитывают семантику и потому не видят плеоназмы. Напротив, методы, ориентированные на смысловую близость, позволяют находить семантическое дублирование, но игнорируют морфологическую структуру и могут пропускать тавтологии. Следовательно, рассмотренные подходы не позволяют одновременно учитывать как морфологическое, так и семантическое сходство слов.

В рамках данной работы используется гибридный (каскадный) подход, при котором разные типы речевой избыточности обрабатываются разными методами:

лексические повторы определяются с помощью лемматизации;

тавтологии выявляются на основе character-level CNN;

плеоназмы обнаруживаются через семантическое сходство с использованием SBERT.

Такое разделение позволяет учитывать лингвистическую природу каждого типа ошибки и обеспечивает более высокую точность поиска по сравнению с универсальными моделями.

##### Свёрточная нейронная сеть для поиска однокоренных слов.

Для выявления тавтологий используется свёрточная нейронная сеть символьного уровня (character-level CNN). Такой выбор обусловлен тем, что тавтологии строятся на морфологической избыточности – слова имеют общий корень и схожую буквенную структуру.

Входными данными для модели являются пары слов. Каждое слово представляется как последовательность символов. Свёрточные фильтры длиной 3–5 символов выделяют локальные паттерны, соответствующие корням, приставкам и суффиксам. Благодаря этому сеть способна автоматически обнаруживать повторяющиеся подстроки, характерные для однокоренных слов.

После свёрточных слоёв применяется подвыборка (pooling), формирующая компактное представление слова. Затем признаки передаются в полносвязные слои, решающие задачу бинарной классификации, определяя, являются ли два слова однокоренными.

Главное преимущество использования свёрточной нейронной сети для задачи выявления тавтологий – отсутствие необходимости в ручном выделении корней или использовании внешних морфологических словарей. Модель сама выделяет значимые морфемные паттерны, что обеспечивает её устойчивость к разным словоформам и вариативности языка. Кроме того, тавтологии определяются, прежде всего, формальным сходством однокоренных слов, а не широким контекстом. Поэтому CNN оказывается здесь предпочтительнее трансформеров, так как она требует меньше вычислительных ресурсов, быстрее обучается и показывает высокое качество даже на малых объёмах данных [4].

##### Выявление плеоназмов на основе семантической близости.

Ключевым этапом семантического анализа текста является построение векторных представлений слов – преобразование слов в многомерные числовые векторы, где близкие по смыслу единицы располагаются рядом.

Современные трансформерные модели (например, BERT) позволяют получать контекстно-зависимые эмбединги, что делает их пригодными для задач семантического анализа, в том числе для обнаружения плеоназмов – сочетаний, в которых слова не являются однокоренными, но дублируют друг друга по смыслу («свободная вакансия», «памятный сувенир»).

Однако стандартные трансформеры кодируют каждое слово в контексте всего предложения, что не всегда оптимально для сравнения именно словосочетаний.

Поэтому в работе используется модель SBERT (Sentence-BERT), дообученная на русскоязычных данных. SBERT преобразует словосочетание в единый вектор (эмбединг), после чего сходство между двумя словами оценивается с помощью

косинусной меры. Такой подход позволяет учитывать совместную встречаемость слов в словосочетании и более точно определять смысловое дублирование. Если два слова в предполагаемом плеоназме оказываются семантически близкими выше заданного порога, конструкция помечается как избыточная [5].

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

##### Алгоритм выявления речевых избыточностей.

При проектировании системы были определены основные этапы ее работы. Работа начинается с получения текста от клиентского приложения. Основной сервис-координатор выполняет лингвистическую предобработку текста: проводит токенизацию, лемматизацию, стемминг и определяет границы слов. Для каждой леммы устанавливается часть речи, после чего в дальнейшем анализе остаются слова, принадлежащие к самостоятельным частям речи.

Далее происходит формирование кандидатов для анализа – пар слов (биграмм), выстроенных на основе синтаксических связей русского языка. К ним относятся согласование, управление и примыкание, а также отношения между компонентами грамматической основы предложения (подлежащим и сказуемым).

На следующем этапе список словосочетаний параллельно направляется в два аналитических модуля.

Алгоритмический сервис проверяет пары с одинаковыми частями речи на совпадение лемм, выявляя прямые лексические повторы.

Сервис машинного обучения использует две последовательные нейросетевые модели: сначала CNN-модель определяет, являются ли слова однокоренными (тавтологиями), затем SBERT-модель оценивает смысловую близость слов для обнаружения плеоназмов.

Сервис-координатор получает результаты от обоих модулей, применяет пороговые значения для окончательной классификации ошибок, собирает статистику и формирует итоговый отчет, который отправляется обратно клиенту.

На рисунке 1 представлена диаграмма деятельности для гибридного алгоритма выявления речевых избыточностей.

##### Диаграмма компонентов системы.

Диаграмма компонентов используется для визуализации организации компонентов системы и зависимостей между ними [6]. На рисунке 2 представлена диаграмма компонентов системы.

##### Описание экранных форм системы.

Экранная форма системы представлена на рисунке 3.

В блоке анализа текста пользователь может ввести текст объемом до 2000 символов и, нажав кнопку «Анализировать текст», запустить его проверку. При нажатии кнопки «Выбрать файл» можно загрузить текстовый файл для анализа. Во время обработки текста кнопка анализа заменяется анимацией загрузки, отображаемой до завершения анализа.

В процессе анализа система автоматически рассчитывает основные показатели текста: количество символов, количество символов без пробелов, количество слов и уровень заспамленности. Полученные значения отображаются в центральной части формы и обновляются после каждого анализа.

Результат проверки выводится в отдельной области справа, где исходный текст отображается с подсветкой найденных проблемных фрагментов. Отдельно выделяются плеоназмы и тавтологии, что позволяет пользователю быстро определить избыточные или повторяющиеся выражения.

Ниже основной формы расположен дополнительный блок результатов анализа, содержащий отдельные секции с перечнем найденных плеоназмов и тавтологий. Каждый проблемный фрагмент выделяется цветом непосредственно в тексте и дублируется в соответствующем разделе.

Метрика заспамленности может изменять цвет в зависимости от полученного значения: зелёный цвет используется при уровне от 0% до 50%, жёлтый – от 50% до 70%, красный – от 70% до 100%.

#### ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Определение лексических повторов, тавтологий и плеоназмов требует совместного использования алгоритмов сравнения строк и методов машинного обучения, где каждый тип ошибок обрабатывается оптимальным для него методом.

Была проведена серия экспериментов для подтверждения эффективности гибридного подхода. Этапы экспериментов:

- сравнить эффективность единой модели классификации и комбинированного подхода;
- экспериментально определить оптимальную архитектуру для каждого типа ошибок;
- оценить влияние объема и качества данных на точность обнаружения плеоназмов;

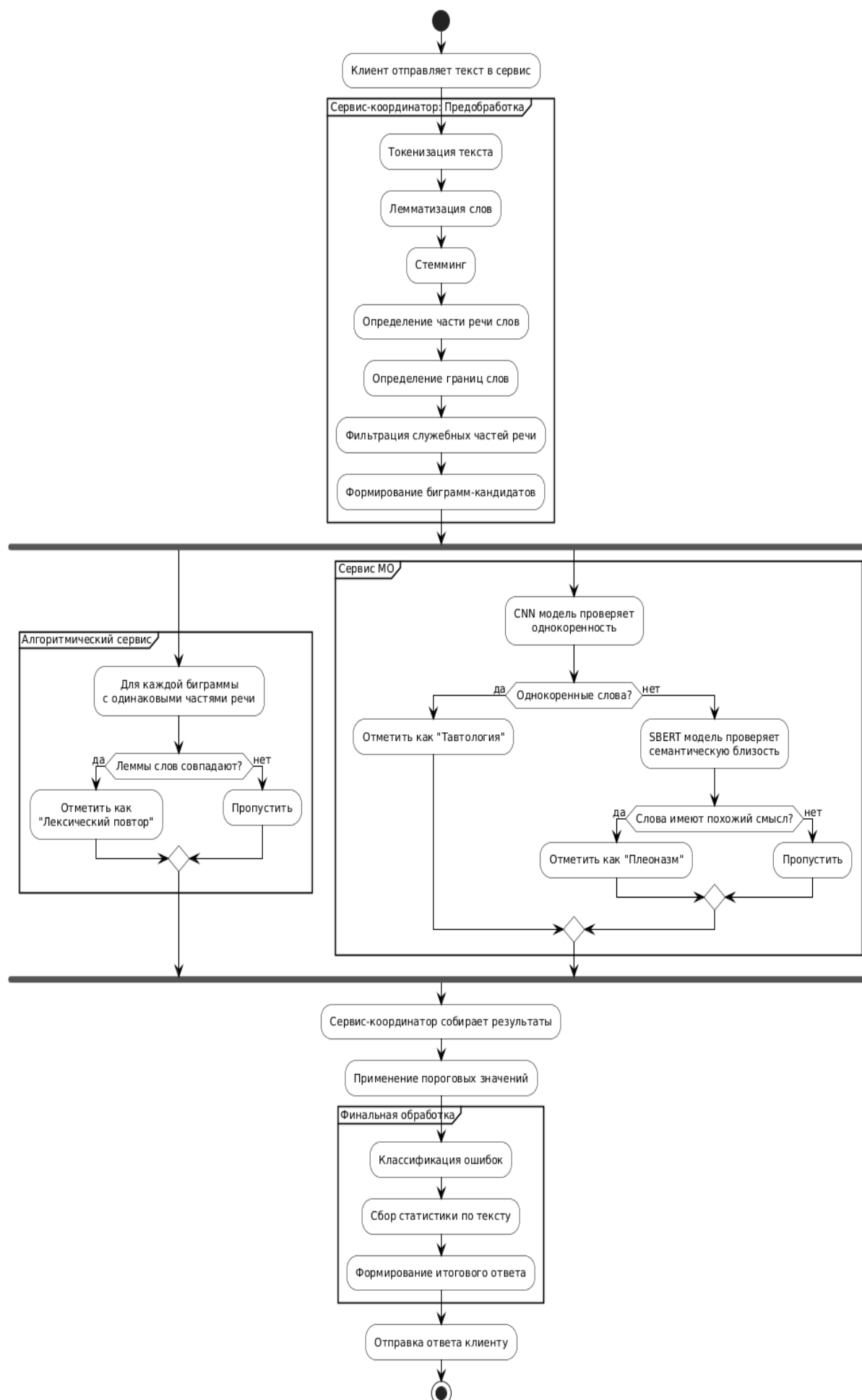


Рисунок 1 – Алгоритм выявления речевых избыточностей



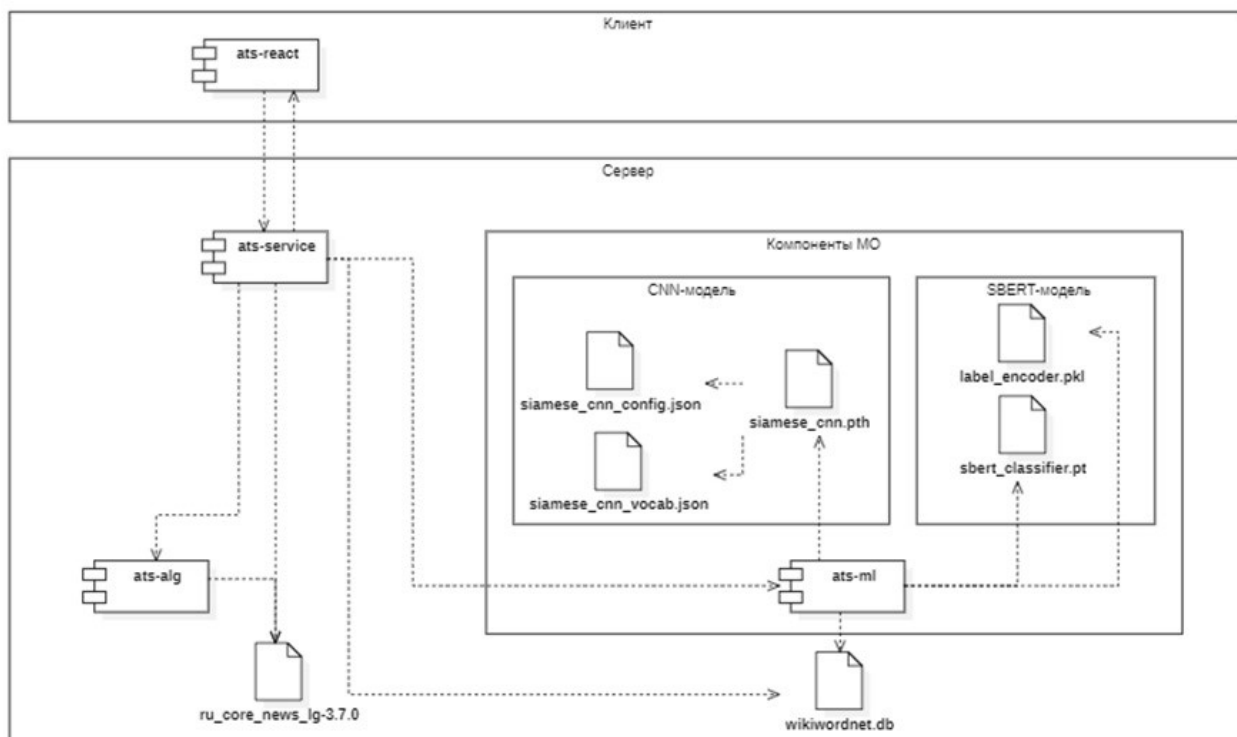


Рисунок 2 – Диаграмма компонентов системы

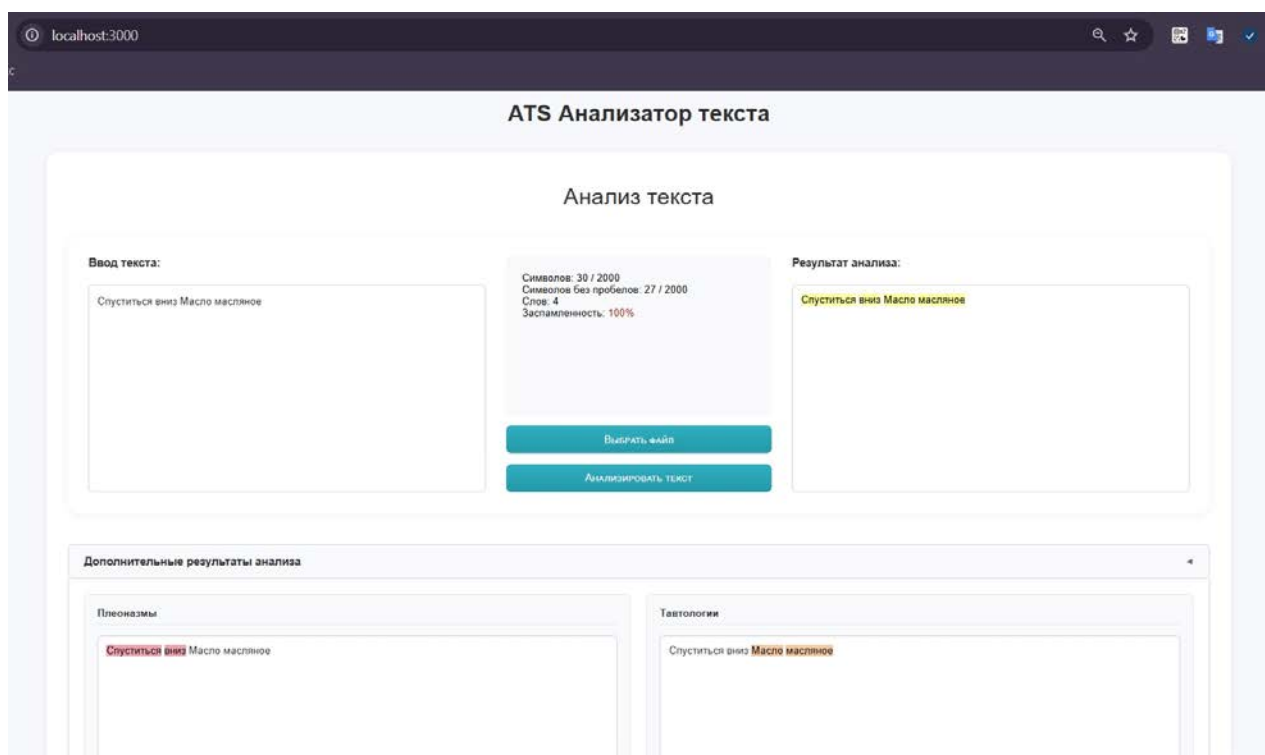


Рисунок 3 – Экранная форма системы

проверить, позволяет ли использование порогов уверенности модели улучшить классификацию.

Эксперименты разделены на три этапа, где каждый следующий этап строится на результатах предыдущего.

На первом этапе нужно получить общее представление о том, как машинное обучение справляется с поиском речевых ошибок. Для этого обучаются две простые модели. Одна модель будет пытаться разделить словосочетания на четыре класса: норма, лексические повторы, тавтологии и плеоназмы. Вторая будет решать более простую задачу – отличать ошибочные фразы от нормальных. Ожидается, что точность таких подходов будет невысокой, около 50-60%.

На втором этапе нужно определить, какой подход является наиболее оптимальным для каждого типа ошибок. Для поиска однокоренных слов (например, «масло масляное») лучше всего подойдет такая нейронная сеть, которая анализирует текст по

буквам и хорошо видит повторяющиеся корни слов. Для нахождения плеоназмов, где ошибка в смысле, а не в форме, нужна модель, понимающая семантику. Лексические повторы можно и вовсе не искать с помощью машинного обучения, а делегировать их поиск алгоритмическим методам. Целью данного этапа является подтверждение, что каждая модель хорошо справляется со своим типом ошибки. Ожидается, что модель для поиска однокоренных слов (тавтологий) будет обладать точностью выше **90%**, в то время как для плеоназмов – около **70%**.

На третьем этапе необходимо проверить, как работает гибридный подход. Отдельные модели собираются в одну систему, которая работает как конвейер. Словосочетание сначала проверяется **CNN** на однокоренные слова. Затем то, что **CNN** не нашла, обрабатывается с помощью **SBERT** на семантические ошибки. Также будет проверено, как порядок моделей и их уверенность в ответах влияют на общий результат. Цель всего этапа – создать систему, которая в целом находит речевые ошибки с точностью не менее **70%**.

#### Формирование массивов входных данных.

Модели обучаются на нескольких специализированных датасетах. Для сбора примеров речевых ошибок использованы словари плеоназмов и тавтологий, содержащие общепризнанные случаи избыточных выражений. Для расширения и вариации этих примеров, а также для создания сложных случаев, применяется база данных синонимов **WikiWordNet**. Примеры грамматически корректных фраз отбираются из набора грамматически верных предложений, чтобы обеспечить схожий стиль с ошибочными примерами.

Для решения задачи собрано четыре датасета, которые соответствуют разным задачам обучения. Первый датасет предназначен для мультиклассовой классификации и разделяет фразы на четыре категории: «норма», «лексический повтор», «тавтология» и «плеоназм». Для балансировки объем составляет примерно **500** примеров на класс, что в сумме даст около **2000** записей.

Второй датасет решает задачу бинарной классификации «ошибка/норма». В нем все типы речевых избыточностей (повторы, тавтологии, плеоназмы) объединяются в один класс «ошибка», который противопоставляется классу «норма». Цель – создать сбалансированный набор с соотношением 50/50, примерно по 1500 примеров в каждом классе.

Третий датасет создан специально для обучения модели, которая должна обнаруживать однокоренные конструкции – ключевой признак тавтологий и повторов. Здесь вводится бинарная метка «**has\_same\_root**» (**1** – есть однокоренные слова, **0** – нет). При этом в отрицательные примеры могут попадать как нормальные фразы, так и плеоназмы, что заставляет модель учиться распознавать именно признак общих корней.

Четвертый датасет фокусируется на различении плеоназмов и нормальных выражений. Он необходим для обучения семантической модели, которая должна улавливать смысловую избыточность.

Для оценки эффективности разработанного подхода была проведена серия экспериментов, направленных на сравнение различных стратегий обнаружения речевых избыточностей. Исследование включало как универсальные модели, решающие задачу целиком, так и специализированные модели, ориентированные на отдельные типы ошибок.

#### Мультиклассовая классификация.

В первом эксперименте была поставлена задача многоклассовой классификации, в которой модель должна была различать четыре класса: «норма», «тавтология», «плеоназм» и «лексический повтор». Результаты работы модели представлены в таблице 1.

Параметры работы модели в задаче многоклассовой классификации Таблица 1

| Параметры обучения:                                                                                                                                      | Точность классификации                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| обучающая выборка: 1620 примеров;<br>тестовая выборка: 405 примеров;<br>размер батча: 32;<br>число эпох: 1200;<br>скорость обучения: $5 \cdot 10^{-5}$ . | <b>accuracy: 0,6568;</b><br><b>precision: 0,6589;</b><br><b>recall: 0,6568;</b><br><b>F1-score: 0,6576;</b><br><b>ROC-AUC: 0,8369.</b> |

Наилучшие результаты были получены для классов «лексический повтор» и «норма», для которых **F1-score** составил **0,68** и **0,69** соответственно. Более низкие показатели наблюдались для классов «плеоназм» (**0,61**) и «тавтология» (**0,65**).

Полученные результаты подтверждают, что единая модель испытывает трудности при одновременном различении нескольких близких по смыслу классов. Особенно заметно это проявляется для плеоназмов и тавтологий, поскольку данные типы ошибок обладают пересекающимися признаками. При этом лексические повторы определяются существенно проще, так как имеют более формализуемую структуру.

Таким образом, мультиклассовый подход демонстрирует ограниченную эффективность и не позволяет достичь высокой точности при решении полной задачи обнаружения речевых избыточностей.

Бинарная классификация ошибок.

*Норма и ошибка (тавтологии + плеоназмы).*

Во втором эксперименте задача была упрощена до бинарной классификации. В качестве положительного класса рассматривались тавтологии и плеоназмы, объединённые в общий класс «ошибка», а отрицательный класс соответствовал нормальным примерам. Результаты классификации представлены в таблице 2.

Параметры работы модели в задаче бинарной классификации  
(тавтологии + плеоназмы)

Таблица 2

| Параметры обучения:                                                                                                                                     | Точность классификации                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| обучающая выборка: 1220 примеров;<br>тестовая выборка: 305 примеров;<br>размер батча: 32;<br>число эпох: 500;<br>скорость обучения: $5 \cdot 10^{-5}$ . | <b>accuracy: 0,8131;</b><br><b>precision: 0,7899;</b><br><b>recall: 0,7751;</b><br><b>F1-score: 0,7815;</b><br><b>ROC-AUC: 0,8847.</b> |

Для класса «ошибка» **F1-score** достиг **0,86**, тогда как для класса «норма» данный показатель составил **0,70**. Это свидетельствует о том, что модель значительно лучше распознаёт наличие речевой избыточности, чем корректные примеры.

Полученные результаты показывают, что при исключении лексических повторов и сведении задачи к различению нормы и ошибок качество классификации заметно возрастает по сравнению с мультиклассовой постановкой.

Добавление лексических повторов в общий класс ошибок повысило бы итоговые метрики, поскольку данный тип ошибок обладает наиболее формальными и легко выделяемыми признаками. Однако подобное улучшение нельзя считать признаком более качественного решения задачи, так как лексические повторы могут эффективно определяться алгоритмическими методами без применения нейросетевых моделей. Таким образом, включение лексических повторов в общий класс ошибок потенциально приводит к искусственному завышению качества модели и снижает объективность сравнения.

*Норма и плеоназм.*

В третьем варианте бинарной классификации модель обучалась различать только норму и плеоназмы. Из обучающей выборки были исключены как тавтологии, так и лексические повторы. Результаты работы модели приведены в таблице 3.

Параметры работы модели в задаче бинарной классификации  
(плеоназмы)

Таблица 3

| Параметры обучения:                                                                                                                                    | Точность классификации                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| обучающая выборка: 797 примеров;<br>тестовая выборка: 200 примеров;<br>размер батча: 32;<br>число эпох: 250;<br>скорость обучения: $5 \cdot 10^{-5}$ . | <b>accuracy: 0,8000;</b><br><b>precision: 0,8011;</b><br><b>recall: 0,7997;</b><br><b>F1-score: 0,7997;</b><br><b>ROC-AUC: 0,8566.</b> |

Для класса «плеоназм» **F1-score** составил **0,81**, а для класса «норма» – **0,79**.

Несмотря на отсутствие формальных признаков, характерных для тавтологий и лексических повторов, модель показала устойчивые результаты. Это подтверждает, что семантические эмбединги действительно позволяют выявлять плеоназмы как отдельный тип речевой избыточности.

При этом при бинарной классификации показатели второго эксперимента лишь незначительно уступают результатам первого, что говорит о высокой эффективности подхода даже в условиях более сложной и менее формализуемой задачи.

*Выявление однокоренных слов с помощью CNN.*

Для проверки возможности автоматического определения тавтологий была обучена сверточная нейронная сеть, ориентированная на задачу выявления однокоренных слов.

В качестве отрицательного класса использовались разнокоренные пары слов, соответствующие норме и плеоназмам, а в качестве положительного: однокоренные пары, соответствующие тавтологиям. Результаты работы модели приведены в таблице 4.

Параметры работы модели в задаче определения тавтологий

Таблица 4

| Параметры обучения:                                                                                                                       | Точность классификации                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| обучающая выборка: 1620 примеров;<br>тестовая выборка: 405 примеров;<br>размер батча: 32;<br>число эпох: 20;<br>скорость обучения: 0,001. | <b>accuracy: 0,9531;</b><br><b>precision: 0,9390;</b><br><b>recall: 0,9709;</b><br><b>F1-score: 0,9547;</b><br><b>ROC-AUC: 0,9920.</b> |

Для класса «разнокоренные» F1-score составил 0,95 и для класса «однокоренные» – 0,95.

Полученные результаты показывают, что задача определения общего корня является существенно более формализуемой по сравнению с задачами семантического анализа. Сверточная нейронная сеть успешно выделяет характерные морфологические паттерны и демонстрирует высокую устойчивость при распознавании однокоренных слов.

Высокое значение recall для класса «однокоренные» указывает на то, что модель практически не пропускает тавтологии. Это особенно важно в рамках построения гибридной системы, поскольку CNN может использоваться как отдельный фильтр, позволяющий автоматически исключать тавтологические конструкции до этапа семантического анализа.

*Эксперимент с аугментацией датасета плеоназмов.*

Для оценки влияния объема данных на качество обнаружения плеоназмов был проведен эксперимент с аугментацией обучающей выборки. Целью эксперимента было определить, можно ли повысить эффективность модели SBERT за счёт увеличения количества примеров класса «плеоназм» без привлечения дополнительной ручной разметки.

Исходная выборка содержала 500 примеров плеоназмов, собранных на основе словарей речевых ошибок. Для аугментации был использован словарь WikiWordNet. К каждому слову в составе плеонастической пары подбирались до трех синонимов, после чего генерировались новые сочетания вида «синоним\_1 + синоним\_2». Сгенерированные пары, совпадающие с исходными или являющиеся заведомо некорректными, отфильтровывались.

После аугментации в итоговом датасете оказалось 500 примеров класса «норма» и 2000 примеров класса «плеоназм». Такая асимметрия в данных помогает проверить способность модели обобщать признаки при значительном дисбалансе, а также оценить максимально достижимую точность при увеличении объема данных.

По результатам эксперимента модель достигла:

**accuracy: 0,8812;**  
**precision: 0,8765;**  
**recall: 0,8890;**  
**F1-score: 0,8827;**  
**ROC-AUC: 0,9315.**

Аугментация с использованием синонимических замен позволила значительно повысить качество обнаружения плеоназмов без привлечения дополнительной ручной разметки. Увеличение объема данных с 500 до 2000 примеров класса «плеоназм» привело к росту всех метрик, значение ROC-AUC превысило 0,93, что свидетельствует о высокой разделяющей способности модели.

Полученные результаты показывают, что SBERT может эффективно обобщать семантические признаки даже при значительном дисбалансе классов, если обучающая выборка остаётся репрезентативной. При этом аугментация на основе синонимических словарей представляет собой практически значимый метод расширения данных в задачах, где ручная разметка трудоёмка.

*Гибридная система.*

На основе результатов предыдущих экспериментов была предложена гибридная архитектура, в которой разные типы речевой избыточности обрабатываются специализированными методами.

Работа системы организована следующим образом:

лексические повторы выявляются алгоритмически на основе совпадения лемм;  
тавтологии определяются как пары однокоренных слов с помощью CNN;  
плеоназмы выявляются с использованием SBERT-модели, обученной различать норму и семантическую избыточность.

Этот подход позволяет разделить задачу на несколько более простых подзадач, каждая из которых решается наиболее подходящим методом.

Проведённые эксперименты показывают, что универсальная мультиклассовая модель демонстрирует ограниченное качество, поскольку ей приходится одновременно учитывать как формальные, так и семантические признаки различных типов ошибок. Напротив, специализированные модели оказываются значительно эффективнее:

для выявления тавтологий CNN достигла F1-score 0,9547;  
для выявления плеоназмов SBERT-модель достигла F1-score 0,8827;  
лексические повторы могут определяться алгоритмически практически безошибочно.

Таким образом, гибридная система позволяет добиться более высокой точности и интерпретируемости результатов по сравнению с универсальными моделями. Кроме того, такой подход лучше соответствует лингвистической природе задачи,

поскольку разные типы речевой избыточности имеют отличающуюся друг от друга структуру и требуют специализированных методов анализа.

*Совокупная вероятность корректной классификации.*

Пусть:

$P_1$  – вероятность того, что алгоритмический этап корректно определит наличие или отсутствие лексического повтора;

$P_2$  – вероятность корректного определения тавтологии CNN при условии, что лексического повтора нет;

$P_3$  – вероятность корректного определения плеоназма SBERT при условии, что ни повтора, ни тавтологии не обнаружено.

Тогда вероятность того, что система даст верный ответ для произвольной биграммы, может быть оценена как [7]:

$$P_{total} = 1 - [(1 - P_1) + (P_1 \cdot (1 - P_2)) + (P_1 \cdot P_2 \cdot (1 - P_3))]$$

Система ошибается только в том случае, когда ошибка происходит на том этапе, который должен был обработать данный тип избыточности, и при этом предыдущие этапы не сработали ложно.

На основе проведенных экспериментов приняты следующие значения:

$P_1 = 1,0$  (лексические повторы определяются алгоритмически со 100 % точностью, поскольку леммы либо совпадают, либо нет);

$P_2 = 0,9547$  (CNN, F1-score по классу «однокоренные»);

$P_3 = 0,8827$  (SBERT на аугментированном датасете, F1-score по классу «плеоназм»).

Таким образом, вероятность выявления ошибки на этапе тавтологий:

$$1 - P_2 = 0,0453$$

А вероятность ошибки на этапе плеоназмов при условии, что предыдущие этапы не ошиблись:

$$1 - P_3 = 0,1173$$

Совокупная вероятность ошибки системы составляет:

$$P_{error} = (1 - P_1) + P_1 \cdot (1 - P_2) + P_1 \cdot P_2 \cdot (1 - P_3)$$

$$P_{error} = 0 + 1 \cdot 0,0453 + 1 \cdot 0,9547 \cdot 0,1173$$

$$P_{error} = 0,0453 + 0,1120 = 0,1573$$

Таким образом, финальная вероятность корректного определения речевой избыточности системой равна

$$P_{total} = 1 - 0,1573 = 0,8427.$$

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты проведенных экспериментов показывают, что задача обнаружения речевых избыточностей не может эффективно решаться единой универсальной моделью. Разные типы ошибок имеют различную природу: лексические повторы основаны на совпадении лемм, тавтологии – на наличии общего корня, а плеоназмы – на семантической близости.

Наиболее высокие результаты были достигнуты при использовании специализированных методов для каждого типа ошибки. Свёрточная нейронная сеть показала высокую эффективность в задаче определения однокоренных слов, а модель на основе SBERT успешно выявляла плеоназмы даже без опоры на формальные признаки.

Следовательно, наиболее перспективным решением является гибридная система, сочетающая алгоритмические методы, CNN и семантические эмбединги. Такой подход обеспечивает высокое качество классификации, снижает количество ложных срабатываний и делает систему более устойчивой при работе с различными типами речевой избыточности.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бернштейн, М. С. Soylent: A Word Processor with a Crowd Inside / М. S. Bernstein, G. Little, R. C. Miller, B. Hartmann, M. S. Ackerman, D. R. Karger, D. Crowell, K. Panovich // Communications of the ACM. – 2015. – August. – С. 94.
2. Почему Chat GPT говорит по-русски с нейронным акцентом? Специфика токенизации кириллицы нейронной сетью от Open AI [Электронный ресурс] URL: <https://temofeev.ru/info/articles/pochemu-chat-gpt-govorit-po-russki-s-neyronnym-aktsentom-spetsifika-tokenizatsii-kirillitsy-neyronno/> (дата обращения: 05.05.2026).
3. GPT-5 оказалась хуже старой модели [Электронный ресурс] URL: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2025/08/16/26510336.shtml>.
4. Архитектура сверточной нейронной сети [Электронный ресурс] URL: <https://studfile.net/preview/6871496/page/8/>.
5. Sentence-Transformers: Полное руководство по созданию векторных эмбедингов для текста и революции в семантическом поиске [Электронный ресурс] URL: <https://radiotochki.net/blog/ai/sentence-transformers-polnoe-rukovodstvo-po-sozdaniyu-vektornyh-embeddingov-dlya-teksta-i-revolyucii-v-semanticheskom-poiske.html>.
6. UML: обзор основных типов диаграмм, диаграмма компонентов. Часть 2 [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/articles/756552/> (дата обращения: 05.05.2026).
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Юрайт, 2020. – 479 с.

УДК 004.728

**Колбанев<sup>1</sup> М.О., Шамин<sup>2</sup> А.А.**

<sup>1,2</sup> Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> mokolbanev@mail.ru

<sup>2</sup> al.shamin@mail.ru

## **КИБЕРПРОСТРАНСТВО КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

**Аннотация.** Киберпространство рассматривается как фундаментальная технологическая среда цифровой трансформации. Актуальность работы обусловлена расширением возможностей кибернетического подхода и необходимостью систематизации свойств, структуры и уровней киберпространства в условиях глобальной цифровизации. Целью исследования является анализ киберпространства через призму его сущностных свойств, технологических уровней и роли сквозных технологий. В работе использованы методы классификации пространств деятельности, структурно-функционального анализа и сравнительного изучения международных определений. Показано, что киберпространство обладает тремя ключевыми свойствами: искусственностью, материальностью и информационностью. Выделены три технологических уровня (АЦП, цифровая инфраструктура, цифровые технологии), обеспечивающие конвергенцию физического и информационного миров. Практическая значимость работы заключается в формировании архитектурного понимания киберпространства для проектирования устойчивых и энергоэффективных цифровых систем.

**Ключевые слова:** информационное взаимодействие, кибернетика, киберпространство, сквозные технологии, цифровая инфраструктура, цифровая трансформация

**Kolbanev<sup>1</sup> M.O., Shamin<sup>2</sup> A.A.**

<sup>1,2</sup> Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> mokolbanev@mail.ru

<sup>2</sup> al.shamin@mail.ru

## **CYBERSPACE AS A TECHNOLOGICAL BASIS FOR DIGITAL TRANSFORMATION**

**Abstract.** Cyberspace is considered as a fundamental technological environment for digital transformation. The relevance of this work is due to the expanding possibilities of the cybernetic approach and the need to systematize the properties, structure, and levels of cyberspace in the context of global digitalization. The purpose of this study is to analyze cyberspace through the lens of its essential properties, technological levels, and the role of end-to-end technologies. The study uses methods of classification of activity spaces, structural and functional analysis, and comparative analysis of international definitions. It is shown that cyberspace has three key properties: artificiality, materiality, and informationality. Three technological levels (ADC, digital infrastructure, and digital technologies) are identified that ensure the convergence of the physical and information worlds. The practical significance of the work lies in the formation of an architectural understanding of cyberspace for the design of sustainable and energy-efficient digital systems.

**Keywords:** information interaction, cybernetics, cyberspace, end-to-end technologies, digital infrastructure, digital transformation

### **ВВЕДЕНИЕ**

В 1948 г. Н. Винер ввел в научный оборот понятие «кибернетика» как науку о связи, управлении и контроле в машинах и живых организмах [1]. Развитие масштабной цифровой трансформации привело к формированию производного понятия «киберпространство», отражающего существенное расширение возможностей кибернетического подхода при организации связи и управления в глобальном масштабе. Киберпространство стало родоначальником новых дефиниций (кибербезопасность, киберфизические системы, криптовалюты, киберспорт и др.), став неотъемлемой технологической основой современных процессов цифровой трансформации [2, 3].

В русскоязычных нормативных актах содержательные определения киберпространства отсутствуют, тогда как международные стандарты и документы ведущих стран (США, Япония, Китай) дают различные акценты, преимущественно в контексте инфраструктуры, безопасности и устойчивого экономического развития [4, 5]. Это обуславливает актуальность системного исследования киберпространства как самостоятельной среды деятельности. Цель работы – раскрыть сущностные свойства, структуру и технологические уровни киберпространства. Научная новизна заключается в представлении киберпространства как конвергентной среды, объединяющей материальную и информационную компоненты через три технологических уровня и сквозные технологии.

### **КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВ И СУЩНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КИБЕРПРОСТРАНСТВА**

Пространственные характеристики традиционно изучаются в естественных и искусственных науках. Естественные пространства существуют независимо от человека, а искусственные создаются для повышения эффективности деятельности. Материальные пространства охватывают области существования физических объектов,

а информационные – комплекс зафиксированных результатов мыслительной деятельности (табл. 1).

Классификация пространств деятельности по их сущностным свойствам Таблица 1

|                                                                           | Естественные                                                                                                                                  | Искусственные                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Материальные                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• физическое</li> <li>• биологическое</li> <li>• воздушное</li> <li>• водное</li> <li>• ...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• дисковое</li> <li>• параметров</li> <li>• сценическое</li> <li>• ...</li> </ul>       |
| Информационные                                                            | -                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• виртуальное</li> <li>• вероятностное</li> <li>• когнитивное</li> <li>• ...</li> </ul> |
| <b>КИБЕРПРОСТРАНСТВО</b><br>Искусственное + Материальное + Информационное |                                                                                                                                               |                                                                                                                                |

В предложенной классификации киберпространство уникально сочетает три свойства: оно является искусственным (создается людьми для оптимизации процессов), материальным (включает физические носители: сети, ЦОДы, устройства, базовые станции) и информационным (содержит цифровые данные как результаты познания и измерений). Киберпространство определяется как комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих цифровых систем, используемых для сохранения, распространения и переработки информации в форме цифровых данных (рис.1).

На практике киберпространство имеет две стороны: видимую материальную инфраструктуру и виртуальную суть, проявляющуюся в процессах коммуникации субъектов и трансформации социальной сферы. При этом основную ценность и риск представляют не сами технические средства, а данные, циркулирующие по линиям связи, сохраняемые в хранилищах и обрабатываемые процессорами.

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УРОВНИ И РОЛЬ СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Функционирование киберпространства обеспечивается тремя неотъемлемыми технологическими уровнями, соответствующими архитектуре цифровой трансформации [6] (рис. 1):

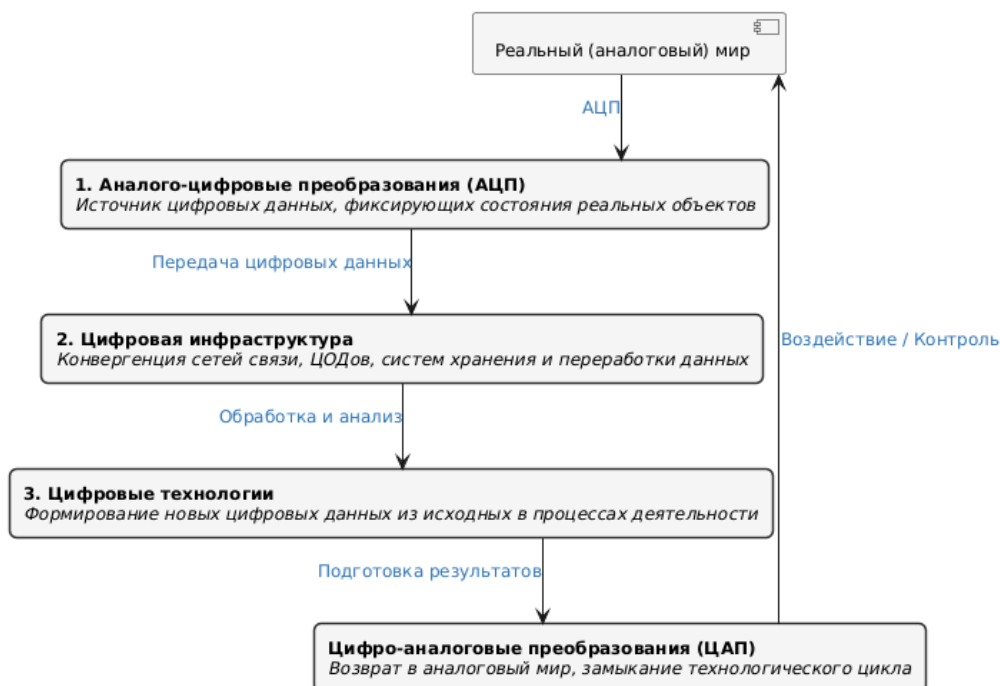


Рисунок 1. Технологические уровни киберпространства

Уровень аналого-цифровых преобразований (АЦП) – уникальный искусственный процесс, являющийся источником цифровых данных, фиксирующих состояния реальных объектов в дискретные моменты времени.

Цифровая инфраструктура – единственная среда существования цифровых данных, образованная конвергенцией сетей связи, систем хранения и переработки данных.

Цифровые технологии – формируют в процессах деятельности новые цифровые данные из исходных, обеспечивая взаимодействие человека с объектами через «посредников» – данные и алгоритмы.

Обратное преобразование (ЦАП) обеспечивает возврат в аналоговый мир, замыкая технологический цикл.

Динамика и синергетическая сила киберпространства создаются сквозными технологиями (ИИ, большие данные, распределенные реестры, квантовые технологии, XR, нейротехнологии и др.) (табл. 2). Технология считается сквозной, если она создает новые экономические блага и рынки, способствует устойчивому развитию, трансформирует традиционные процессы и меняет модели поведения населения [7]. Эти технологии объединяются в киберпространстве, формируя облачные системы, интернет вещей, цифровые платформы и экосистемы.

Примеры сквозных технологий киберпространства

Таблица 2

| Группа технологий                         | Ключевые направления                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Искусственный интеллект и нейротехнологии | Машинное обучение, компьютерное зрение, обработка естественных языков (NLP), распознавание речи, образов и жестов, технологии поддержки принятия решений, биометрия |
| Беспроводная связь и сенсорика            | 5G/6G, интернет вещей (IoT), спутниковая навигация, сенсорные системы                                                                                               |
| Распределенные реестры                    | Блокчейн, смарт-контракты, распределенные базы данных                                                                                                               |
| Большие данные                            | Интеллектуальный анализ данных (Data Mining), распределенные файловые системы, обработка неструктурированных данных, визуализация                                   |
| Облачные и периферийные вычисления        | Cloud computing, fog computing, edge computing, высокопроизводительные вычисления (HPC)                                                                             |
| VR/AR/MR                                  | Виртуальная, дополненная и смешанная реальности                                                                                                                     |
| Квантовые технологии                      | Квантовые вычисления, квантовая криптография                                                                                                                        |
| Новые производственные технологии         | Робототехнические системы, киберфизические системы, умная пыль (smart dust)                                                                                         |

#### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПОДХОДЫ

Масштаб киберпространства достигается за счет конвергенции материального и информационного начал, что позволяет обслуживать глобальное число пользователей, охватывать всю территорию Земли и космос, а также хранить практически всю информацию, созданную человечеством. Влияние киберпространства на эффективность деятельности состоит не в создании новых смыслов, а в накоплении больших объемов данных и реализации операций по их передаче и переработке. Киберпространство делает эффективными не тех, кто владеет большими смыслами, а тех, кто интенсивнее коммуницирует и оперирует данными.

Однако функционирование киберпространства сопряжено с рисками в трех измерениях: материальном (высокое потребление энергоресурсов), информационном (угрозы несанкционированного доступа и утечек) и когнитивном (влияние враждебных данных на сознание человека). Международные подходы к определению киберпространства варьируются: ISO/IEC 27032 акцентирует взаимодействие людей, ПО и услуг в интернете; США – глобальную информационную среду и инфраструктуру; Япония – пространство инноваций и устойчивого развития [8, 9]; Китай – интернет, сети и системы автоматического управления [10]. Это подчеркивает многоаспектность киберпространства как объекта управления и развития. Международные подходы к определению киберпространства представлены в таблице 3.

Международные подходы к определению киберпространства

Таблица 3

| Страна/Организация | Акцент в определении                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ISO/IEC 27032:2023 | Сложная среда, возникающая в результате взаимодействия людей, программного обеспечения и услуг в интернете, поддерживаемая распределенными физическими устройствами ИКТ и подключенными сетями                                          |
| США                | Глобальная информационная среда, состоящая из взаимозависимых сетей, информационной инфраструктуры и данных, включая интернет, телекоммуникационные сети, компьютерные системы, встроенные процессоры и контроллеры                     |
| Япония             | Пространство, основанное на интернете, расширенное за счет развития цифровых технологий и множества независимых участников, где создается интеллектуальная собственность в форме технологических инноваций и новых моделей деятельности |
| Китай              | Киберпространство состоит из интернета, коммуникационных сетей, компьютерных систем, систем автоматического управления, цифровых устройств и приложений, услуг и данных                                                                 |



#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Киберпространство представляет собой не просто техническую инфраструктуру, а новую глобальную среду деятельности, где ценность создается скоростью передачи данных, объемом их накопления и эффективностью обработки. Предложенная структура из трех технологических уровней и классификация сущностных свойств позволяют рассматривать киберпространство как архитектурную основу для развития цифровых систем и внедрения сквозных технологий. Понимание его двойственной природы (материальной и виртуальной) и учет негативных измерений (энергетического, информационного, когнитивного) являются ключевыми условиями для устойчивой цифровой трансформации. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию взаимодействия сквозных технологий в условиях растущих вычислительных и энергетических нагрузок, а также на разработку стандартизированных подходов к управлению киберпространством на национальном и международном уровнях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Наука, 1983. 338 с.
2. Смоленцева, Т. Е. Единое информационное пространство как фактор повышения качества разработки программного обеспечения / Т. Е. Смоленцева, Н. А. Приходько // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2025. Т. 2. С. 345-348.
3. Коршунов Г. И. Моделирование физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах / Г. И. Коршунов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1(41). С. 23-28. DOI 10.21685/2307-4205-2023-1-3.
4. ISO/IEC 27032:2023: Cybersecurity – Guidelines for Internet security. Режим доступа: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/76070/be57667fdd0b432490c253ca538c9938/ISO-IEC-27032-2023.pdf>
5. The White House. National Cybersecurity Strategy/ The White House. – March 2023. Режим доступа: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/03/National-Cybersecurity-Strategy2023.pdf>.
6. Шамин А. А. Системный подход разработки архитектуры аналитических цифровых платформ / А. А. Шамин, М. О. Колбанев, А. Д. Черемухин // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11, № 5. С. 28-40.
7. Шамин А. А. Сквозные технологии цифровой трансформации в образовании / А. А. Шамин // Информатизация образования и науки. 2026. Т. 69, № 1. С. 18-35.
8. Sumbal A. et al. Cybersecurity and Great-Power Competition: US-China Strategic Rivalry in Cyberspace //Journal of Political Stability Archive, 2026. Vol. 4(1). pp. 386-400.

**Пестряева<sup>1</sup> С. Ю.**

<sup>1</sup> Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия

<sup>1</sup> pesveta@gmail.com

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХЕТИПИЧЕСКИХ МЕТАФОР В ЭРИКСОНОВСКОМ ГИПНОЗЕ И ЮНГИАНСКОЙ АКТИВНОЙ ИМАГИНАЦИИ**

**Аннотация.** Проводится сравнительный анализ использования архетипических метафор в эриксоновском гипнозе и юнгианской активной имажинации как двух ключевых направлениях глубинной психологии. Рассматривается, как в эриксоновском гипнозе метафоры и образы функционируют как инструменты непрямого воздействия, обходя сопротивление сознания и напрямую включаясь в бессознательные паттерны, тогда как в активной имажинации метафоры и архетипы становятся объектом диалога и осознанного переживания, раскрывая структуру коллективного бессознательного. Сопоставление этих подходов показывает разные способы работы с архетипическим слоем психики.

**Ключевые слова:** архетипическая метафора, эриксоновский гипноз, юнгианская активная имажинация, коллективное бессознательное

**Pestryaeva<sup>1</sup> S. U.**

<sup>1</sup> Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russia

<sup>1</sup> pesveta@gmail.com

### **A COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHETYPAL METAPHORS IN ERICKSONIAN HYPNOSIS AND JUNGIAN ACTIVE IMAGINATION**

**Abstract.** This article provides a comparative analysis of the use of archetypal metaphors in Ericksonian hypnosis and Jungian active imagination, two key approaches to depth psychology. It examines how, in Ericksonian hypnosis, metaphors and images function as tools of indirect influence, bypassing conscious resistance and directly tapping into unconscious patterns. In active imagination, metaphors and archetypes become the object of dialogue and conscious experience, revealing the structure of the collective unconscious. A comparison of these approaches reveals different ways of working with the archetypal layer of the psyche.

**Keywords:** archetypal metaphor, Ericksonian hypnosis, Jungian active imagination, collective unconscious

В психологии анализ архетипических метафор раскрывает механизмы символического уровня психики, расширяет понимание юнгианской теории коллективного бессознательного и одновременно демонстрирует практическую значимость архетипических образов в экзистенциальной практике. Это позволяет психологам более последовательно работать с символами, как транзитурными формами переживания, а также уточнить место метафоры как универсального инструмента психотерапевтического и коучингового сопровождения.

#### **Актуальность сравнительного исследования**

Эриксоновский гипноз и юнгианская активная имажинация используют образы, символы и метафоры для доступа к бессознательному. Однако эти два метода имеют различную теоретическую базу, техническую процедуру и роль психолога. Настоящая статья посвящена **систематическому сравнению** двух подходов с целью выявления их сходств, различий и возможных точек интеграции.

Актуальность сравнения обусловлена следующими факторами:

оба метода доказали свою эффективность в работе с широким спектром психологических проблем;

практикующие психологи часто выбирают один из методов, не осознавая потенциала их взаимодополнения;

отсутствие в литературе систематических сравнительных исследований затрудняет интеграцию этих подходов [1, с. 3-5].

#### **Теоретическое основание: два подхода к работе с бессознательным**

**Юнгианская активная имажинация** — это метод, разработанный К.Г. Юнгом в 1913–1916 годах, который заключается в сознательном «вхождении» в диалог с образами бессознательного [2, с. 234]. Клиент в бодрствующем состоянии или в лёгком трансе наблюдает за спонтанно возникающими образами, вступает с ними в диалог, задаёт вопросы и получает ответы. Роль психолога — быть «проводником» и «интерпретатором», но не вмешиваться в процесс [3, с. 78].

**Эриксоновская метафора** — это метод косвенного внушения, при котором психолог рассказывает историю, содержащую символическое решение проблемы клиента. Клиент не вступает в активный диалог с образами, а пассивно (в трансовом состоянии) воспринимает историю. Бессознательное клиента самостоятельно «извлекает» из метафоры релевантный смысл и применяет его к своей ситуации [4, с. 156].

#### **Работа с одной и той же проблемой двумя методами**

Для иллюстрации различий и сходств двух методов рассмотрим **психологическую проблему: страх публичных выступлений** у молодого специалиста-презентатора, 28

лет, не имеющего психиатрического диагноза, но испытывающего значительный дискомфорт при необходимости выступать перед группой более 10 человек.

**Феноменология проблемы:** учащённое сердцебиение, дрожь в голосе, забывание текста, избегающее поведение (отказ от выступлений, передача слова другим).

**Параметры сравнительного анализа**

Таблица 1

На основе работ Юнга [2; 5], Эриксона [4; 6] и сравнительных исследований [1; 7] выделены следующие параметры сравнения:

|                    |                                                                    |                                                                                   |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Параметр           | Юнгианская активная имажинация                                     | Эриксоновская метафора                                                            |
| Автор метода       | К.Г. Юнг (1910–1920-е гг.)                                         | М. Эриксон (1950–1970-е гг.)                                                      |
| Теоретическая база | Аналитическая психология, теория архетипов                         | Теория транса, косвенного внушения, утилизации                                    |
| Состояние клиента  | Бодрствующее или лёгкий транс (открытые глаза)                     | Глубокий или средний транс (часто закрытые глаза)                                 |
| Активность клиента | Высокая: клиент говорит, рисует, двигается, задаёт вопросы         | Низкая: клиент слушает, воспринимает, не вербализует                              |
| Роль психолога     | Проводник, переводчик, интерпретатор (активная, но не директивная) | Рассказчик, «садовник» (директивная в форме, не директивная в содержании)         |
| Источник метафор   | Спонтанные образы самого клиента                                   | Готовые или адаптированные истории психолога                                      |
| Механизм изменения | Сознательная интеграция образа через диалог и понимание            | Бессознательное усвоение через обход сознательной цензуры                         |
| Скорость эффекта   | Относительно медленная (требует времени на осмысление)             | Относительно быстрая (часто в течение одной сессии)                               |
| Глубина работы     | Глубокая (достигает архетипических слоёв, требует рефлексии)       | Глубокая (достигает тех же слоёв, но без рефлексии)                               |
| Противопоказания   | Острые психотические состояния, низкая рефлексия                   | Острые состояния, требующие немедленного действия, скептицизм в отношении гипноза |

**Решение методами юнгианской активной имажинации**

Таблица 2

**Процедура** (в соответствии с протоколом, описанным М.-Л. фон Франц [8, с. 112–115]):

|   | Процедура                   | Психолог                                                                                                                                                                                        | Клиент                                                                                                                                                                                  |
|---|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Подготовка                  | объясняет клиенту суть метода: «Вы закроете глаза, будете наблюдать за образами, которые приходят, и будете с ними разговаривать. Я буду рядом, буду задавать вопросы, но образы будут вашими». |                                                                                                                                                                                         |
| 2 | Вход в состояние            |                                                                                                                                                                                                 | закрывает глаза, делает несколько глубоких вдохов, представляет «экран» перед внутренним взором.                                                                                        |
| 3 | Спонтанное появление образа | «Что вы видите?»                                                                                                                                                                                | «Я вижу... сцену. Большую, чёрную сцену. А вокруг темнота. Я стою за кулисами, и меня трясёт».                                                                                          |
| 4 | Диалог с образом            | «Спросите у этого страха, как его зовут<br>«Спросите у Стража, что он охраняет»                                                                                                                 | «Он говорит, что его зовут... Страж. Он не пускает меня на сцену».<br>«Он говорит... он охраняет меня от позора. Если я выйду и ошибусь, меня отвергнут. Он хочет, чтобы меня приняли». |
| 5 | Трансформация образа        | «Спросите у Стража, что ему нужно, чтобы он немного ослабил охрану»                                                                                                                             | «Он говорит... он хочет, чтобы я признал, что он есть. И чтобы я пообещал,                                                                                                              |

|   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                           |
|---|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |            | «Пообещайте»                                                                                                                                                                                                                                                                                               | что не буду выходить без подготовки». «Обещаю».                                                                           |
| 6 | Интеграция | «Теперь посмотрите на Стража. Как он выглядит?»                                                                                                                                                                                                                                                            | «Он... изменился. Он уже не чёрный и страшный. Он похож на старого охранника в музее. Он кивает мне и отходит в сторону». |
| 7 | Завершение | Клиент возвращается в обычное состояние, обсуждает с психологом свой опыт.                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                           |
|   | Результат  | После трёх сессий активной имажинации клиент отметил, что страх не исчез, но стал «менее плотным». Он смог выступить перед группой из 15 человек, хотя и испытывал волнение. Ключевым механизмом стало осознание функции страха (защита от отвержения) и заключение сознательного договора со своей Тенью. |                                                                                                                           |

**Решение методами эриксоновской метафоры**

Таблица 3

Процедура (в соответствии с протоколом, описанным Эриксоном и Росси [6, с. 203–205]):

|   |                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                        | Психолог                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 1 | Наведение транса       | использует косвенные внушения для погружения клиента в лёгкое трансовое состояние (фиксация взгляда, ритмичное дыхание, диссоциативные внушения).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 2 | Предъявление метафоры  | рассказывает следующую историю (адаптированную из [9, с. 45]): «Я вспомнил одну историю. В одном театре работал молодой актёр. Он очень талантливый, но каждый раз перед выходом на сцену его начинало трясти. Он забывал текст, у него пересыхало в горле. Однажды старый режиссёр подошёл к нему и сказал: "Ты думаешь, что страх – твой враг. А он – твой друг. Без него ты бы не готовился так тщательно. Без него ты бы не проверял текст по десять раз. Страх – это твой внутренний режиссёр. Он говорит тебе: "Не опозорься, будь готов". Актёр задумался. "А что мне с ним делать?" – спросил он. Режиссёр ответил: "Поблаговари его. Скажи ему: "Спасибо, я услышал. А теперь я сам". И выйди на сцену. Актёр так и сделал. Он вышел на сцену. В первой сцене он всё ещё волновался. Но во второй сцене он заметил, что страх... не ушёл, но изменился. Он стал похож на лёгкое возбуждение, как перед прыжком в воду. И зрители... они не заметили его страха. Они видели только его игру». |
| 3 | Посттрансовая внушение | «И возможно, в следующий раз, когда ты будешь выходить на свою "сцену", твоё бессознательное уже будет знать... что делать с этим чувством».                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 4 | Возвращение            | Клиент выходит из транса. Психолог не обсуждает метафору, не интерпретирует её.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|   | Результат              | Уже после первой сессии клиент отметил, что «что-то изменилось». Он смог выступить на совещании, не испытывая парализующего страха. После второй сессии страх стал восприниматься как «рабочее волнение». Ключевым механизмом стало бессознательное перекодирование страха из «врага» в «помощника» без необходимости вербализовать или анализировать этот процесс.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

**Сравнительный анализ двух решений**

Таблица 4

| Параметр                       | Юнгианская активная имажинация                                             | Эриксоновская метафора                                                  |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Время работы</b>            | 3 сессии (около 3 часов суммарно)                                          | 2 сессии (около 1,5 часов суммарно)                                     |
| <b>Активность клиента</b>      | Высокая (вербализует образы, ведёт диалог)                                 | Низкая (пассивно слушает)                                               |
| <b>Осознанность механизма</b>  | Высокая (клиент знает, что страх – это "Страж", функция которого – защита) | Низкая (клиент не может объяснить, почему страх уменьшился)             |
| <b>Устойчивость результата</b> | Высокая (клиент приобрёл навык диалога с Тенью на будущее)                 | Высокая (но клиент не знает, как воспроизвести механизм самостоятельно) |
| <b>Риски</b>                   | Клиент может "застрять" в образе, нужна поддержка психолога                | Клиент может стать зависимым от "магии" метафор,                        |

|                                    |                                                  |                                                                               |
|------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                                    |                                                  | нужны дополнительные сессии                                                   |
| <b>Интеграция в повседневность</b> | Клиент может использовать технику самостоятельно | Клиент не может воспроизвести эффект без психолога (без обучения самогипнозу) |

**Сходства и различия: сводная аналитическая таблица**

Таблица 5

| Критерий сходства/различия          | Юнгианская активная имажинация                           | Эриксоновская метафора                                          | Комментарий                      |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Обращение к бессознательному</b> | Да                                                       | Да                                                              | Общая основа                     |
| <b>Использование образов</b>        | Да                                                       | Да                                                              | Общая основа                     |
| <b>Работа с архетипами</b>          | Да, осознанно                                            | Да, неосознанно (бессознательное клиента само "узнаёт" архетип) | Различие в уровне рефлексии      |
| <b>Роль психолога</b>               | Переводчик, проводник                                    | Рассказчик, "садовник"                                          | Различие в степени директивности |
| <b>Скорость эффекта</b>             | Относительно медленная                                   | Относительно быстрая                                            | Различие, обусловленное техникой |
| <b>Глубина устойчивости</b>         | Высокая (клиент обучается методу)                        | Высокая (но клиент не обучается)                                | Различие в "обучающем" эффекте   |
| <b>Требования к клиенту</b>         | Высокая рефлексия, способность к символическому мышлению | Ниже (метод работает даже при низкой рефлексии)                 | Различие в "доступности"         |
| <b>Возможность самоприменения</b>   | Да (после обучения)                                      | Да (только после обучения самогипнозу)                          | Различие в автономности          |

**Возможности интеграции методов**

На основе проведённого сравнения можно предложить **интегративную модель**, в которой два метода используются последовательно или параллельно в зависимости от этапа психологической работы и индивидуальных особенностей клиента.

**Модель 1. Эриксоновская метафора как «вход» для активной имажинации.**

Для клиентов с низкой рефлексией или высоким сопротивлением сначала используется эриксоновская метафора, которая «размягчает» защитные механизмы. Это и активирует архетипические образы. Затем, когда образ уже появился (например, «Страж» из примера выше), клиент может вступить с ним в диалог в рамках активной имажинации. Эриксон сам иногда использовал эту стратегию, хотя и не называл её юнгианским термином [10, с. 89].

**Модель 2. Активная имажинация как подготовка к эриксоновской метафоре.**

Для клиентов с высокой рефлексией и склонностью к анализу сначала используется активная имажинация, которая выявляет ключевые образы и символы проблемы. Затем психолог строит эриксоновскую метафору, используя именно эти образы клиента (а не универсальные архетипические шаблоны). Это повышает точность «попадания» метафоры.

**Модель 3. Чередование методов в зависимости от запроса**

Таблица 6

| Запрос клиента                                  | Предпочтительный метод                      | Обоснование                                             |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| «Я хочу понять, почему я боюсь»                 | Активная имажинация                         | Метод даёт осознание и понимание                        |
| «Я хочу перестать бояться, не вникая в причины» | Эриксоновская метафора                      | Метод даёт результат без анализа                        |
| «Я понимаю причины, но страх не уходит»         | Сначала активная имажинация, затем метафора | Интеграция понимания и бессознательного перекодирования |
| «Я ничего не понимаю, но хочу измениться»       | Сначала метафора, затем активная имажинация | Сначала обход сопротивления, затем осознание            |

**Выводы по разделу**

Юнгианская активная имажинация и эриксоновская метафора являются **двумя разными, но взаимодополняющими методами** работы с бессознательным. Оба метода активируют архетипические структуры, но делают это с разной степенью сознательного участия клиента и активности психолога.

**Ключевое различие** заключается в том, кто является источником образов (клиент в активной имажинации или психолог в эриксоновской метафоре) и насколько клиент осознаёт механизм изменений (высокая рефлексия в активной имажинации или минимальная в метафоре).

**Ключевое сходство** — оба метода основаны на признании того, что бессознательное «говорит» на языке образов и символов, и что прямой, логический, сознательный подход к психологическим проблемам часто недостаточен.

Предложенные **интегративные модели** (метафора как вход для имажинации, имажинация как подготовка к метафоре, чередование методов в зависимости от запроса) открывают перспективу для создания гибкого, адаптивного подхода, который может быть более эффективен, чем каждый из методов по отдельности.

Дальнейшим направлением исследований может стать **эмпирическая проверка эффективности интегративной модели** по сравнению с «чистыми» методами, а также разработка критериев для выбора метода в зависимости от психологического профиля клиента

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханна Б. Активная имажинация и эриксоновский гипноз: сравнительный анализ // Журнал практической психологии. — 2015. — № 3. — С. 3–15.
2. Юнг К.Г. Воспоминания, сновидения, размышления / Пер. с нем. — М.: АСТ, 2019. — 480 с.
3. Юнг К.Г. Отношения между Эго и бессознательным / Пер. с нем. — М.: Академический проект, 2019. — 256 с.
4. Эриксон М., Росси Э., Росси Ш. Гипнотические реальности: наведение клинического гипноза и формы косвенного внушения / Пер. с англ. — М.: Класс, 1999. — 352 с.
5. Юнг К.Г. Архетип и символ / Пер. с нем. — М.: Ренессанс, 1991. — 304 с.
6. Эриксон М., Росси Э. Гипнотерапия. Практическое руководство / Пер. с англ. — М.: Класс, 2006. — 352 с.
7. Гордеев М.Н. Классический и эриксоновский гипноз: практическое руководство. — М.: Издательство Института психотерапии, 2005. — 232 с.
8. Франц М.-Л. фон. Активная имажинация и волшебные сказки // Архетипические паттерны в волшебных сказках / Пер. с англ. — М.: Класс, 2007. — С. 102–130.
9. Хейли Дж. Милтон Эриксон. Целительные истории / Пер. с англ. — М.: Класс, 2001. — 256 с.
10. Эриксон М. Мой голос останется с вами: Обучающие истории / Пер. с англ. — СПб.: Петербург-XXI век, 1995. — 254 с.

**КОЛЛЕКТИВНОЕ БЕССОЗНАТЕЛЬНОЕ КАК ИСТОЧНИК МЕТАФОР:  
МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АРХЕТИПИЧЕСКИХ ИСТОРИЙ**

**Аннотация.** Рассматривается коллективное бессознательное как фундаментальный источник метафор и архетипических образов, формирующих семантические структуры человеческого опыта. Анализируются принципы перевода архетипического содержания в нарративную форму – методы построения архетипических историй, сохраняющих универсальные символы и одновременно встраивающих их в индивидуальный и культурный контекст. Предлагается методология, сочетающая юнгианский подход к архетипам с элементами психолингвистики, позволяющая структурированно создавать метафорические нарративы для психологической и образовательной практики. Работа подчеркивает роль коллективного бессознательного не только как хранителя архетипов, но и как активного конструктора метафор, определяющего лингвистические и семантические рамки человеческого опыта.

**Ключевые слова:** коллективное бессознательное, метафоры, архетипические образы

**THE COLLECTIVE UNCONSCIOUS AS A SOURCE OF METAPHORS:  
A METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING ARCHETYPAL STORIES**

**Abstract.** The article deals with the collective unconscious as a fundamental source of metaphors and archetypal images that shape the semantic structures of human experience. It analyzes the principles of translating archetypal content into narrative form—methods for constructing archetypal stories that preserve universal symbols while simultaneously embedding them in individual and cultural contexts. A methodology is proposed that combines a Jungian approach to archetypes with elements of psycholinguistics, enabling the structured creation of metaphorical narratives for psychological and educational practice. The work emphasizes the role of the collective unconscious not only as a custodian of archetypes but also as an active "constructor of metaphors," defining the linguistic and semantic framework of human experience.

**Keywords:** collective unconscious, metaphors, archetypal images

Актуальность и практическая значимость исследования

Эриксоновские метафоры активируют архетипические структуры коллективного бессознательного, что обеспечивает их высокую терапевтическую эффективность. Однако остаётся открытым вопрос методологического характера: как практикующему психологу, не имеющему многолетнего опыта М. Эриксона, самостоятельно конструировать архетипические метафоры, отвечающие индивидуальному запросу клиента?

В данной статье предлагается методологическое руководство для психолога, в котором:

1. обосновывается концепция коллективного бессознательного как «резервуара» архетипических образов;
2. описывается алгоритм перевода индивидуального запроса клиента на язык архетипической метафоры;
3. предлагаются практические техники конструирования метафор с учётом архетипического «адресата»;
4. приводится типология готовых метафорических сценариев для наиболее частых ситуаций.

Теоретическое основание: коллективное бессознательное как «арсенал» архетипических образов

Согласно К.Г. Юнгу, коллективное бессознательное — это слой психики, общий для всего человечества, который содержит архетипы — универсальные паттерны восприятия, мышления и поведения [1, с. 89]. В отличие от личного бессознательного (которое состоит из вытесненных индивидуальных содержаний), коллективное бессознательное является врождённым и не зависит от личного опыта.

Ключевое положение для психолога: Архетипы не могут быть познаны напрямую, но они проявляются через архетипические образы — в мифах, сказках, сновидениях, религиозных символах, а также в спонтанных метафорах клиента [2, с. 112–115].

Задача психолога, работающего с эриксоновскими метафорами, состоит не в том, чтобы «придумывать» новые архетипы (это невозможно), а в том, чтобы активировать те архетипические образы, которые уже существуют в коллективном бессознательном клиента, но по разным причинам заблокированы или искажены.

Алгоритм построения архетипической метафоры для психолога

На основе анализа работ Эриксона [4; 5], Хейли [6] и Гордеева [7] предлагается следующий алгоритм, состоящий из пяти шагов.

Шаг 1. Сбор метафорического материала клиента.

Таблица 1

Архетипы и их универсальные образы (по Юнгу и фон Франц) [3, с. 45–67]

| Архетип                    | Универсальные образы (символы)              | Культурные вариации                                 |
|----------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Мать                       | Земля, пещера, море, сад, колыбель, чаша    | Деметра (греч.), Исида (егип.), Богородица (христ.) |
| Отец                       | Небо, гора, закон, трон, жезл, солнце       | Зевс (греч.), Один (сканд.), Господь-Отец (христ.)  |
| Ребёнок                    | Семя, яйцо, младенец, цветок, бабочка       | Дионис (греч.), Кришна (индуст.), младенец Иисус    |
| Мудрец                     | Старик, учитель, свет, книга, лабиринт      | Хирон (греч.), Мерлин (кельт.), Дзен-мастер         |
| Герой                      | Путь, битва, дракон, сокровище, возвращение | Геракл, Персей, Беовульф, Синдбад                   |
| Тень                       | Зверь, тень, подвал, враг, монстр           | Волк, змей, дракон, вампир, тролль                  |
| Анима (женское в мужчине)  | Муза, сирена, принцесса, ведьма             | Елена Прекрасная, Кали, Рапунцель                   |
| Анимус (мужское в женщине) | Герой, воин, учитель, титан                 | Ахилл, Синяя Борода, Казанова                       |
| Самость                    | Мандава, круг, крест, философский камень    | Колесо сансары, Христос, Будда                      |

Психолог внимательно слушает спонтанные метафоры, которые клиент использует для описания своей проблемы. Эти метафоры являются «ключами» к актуальному архетипическому состоянию.

| Речевой оборот клиента          | Вероятный архетипический адрес        |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| «Я в тупике», «Не вижу выхода»  | Архетип Странника (путь заблокирован) |
| «Меня преследует прошлое»       | Архетип Тени (неинтегрированный опыт) |
| «Я как будто брошенный ребёнок» | Архетип Ребёнка (дефицит заботы)      |
| «Кто-то должен дать мне знак»   | Архетип Мудреца (дефицит интуиции)    |
| «Я должен всё контролировать»   | Архетип Отца (гиперкомпенсация)       |

Шаг 2. Диагностика нарушенного архетипа.

На основе собранного материала психолог определяет, какой архетип в данный момент является «раненым» или «дефицитным». Важно различать:

| Состояние архетипа  | Характеристика                                           | Пример                                                                               |
|---------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Блокированный       | Архетип присутствует, но его энергия не может проявиться | Талант, который боится выхода (страх успеха)                                         |
| Гиперактивированный | Архетип проявляется в негативной, деструктивной форме    | Гиперопека (негативная Мать), тирания (негативный Отец)                              |
| Дефицитный          | Контакт с архетипом утрачен, клиент ощущает пустоту      | «Я не чувствую себя защищённым» (дефицит Отца), «Я никому не нужен» (дефицит Матери) |

Шаг 3. Выбор архетипического сценария.

Для каждого состояния архетипа существует типовой «сценарий исцеления», который можно положить в основу метафоры [8, с. 134–145].

| Нарушенный архетип         | Сценарий исцеления                   | Базовый сюжет метафоры                                                |
|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Мать (блокированная)       | Обретение безусловного принятия      | Кто-то (или что-то) принимает героя таким, какой он есть, без условий |
| Отец (гиперактивированный) | Смягчение закона, обретение гибкости | Строгий учитель признаёт, что правила могут иметь исключения          |
| Ребёнок (дефицитный)       | Обретение внутренней опоры           | Маленький герой находит ресурс внутри себя (а не снаружи)             |
| Мудрец (блокированный)     | Доверие к интуиции                   | Герой перестаёт «думать» и начинает «чувствовать»                     |
| Герой (блокированный)      | Принятие вызова                      | Герой делает первый шаг, не зная результата                           |
| Тень (негативная)          | Интеграция                           | Монстр оказывается защитником                                         |

Шаг 4. Конструирование метафоры.

Метафора строится по следующей структуре (адаптировано из [9, с. 78–89]):



Экспозиция (1–2 предложения): Введение героя и места действия. Важно, чтобы место действия было нейтральным или позитивно окрашенным (лес, сад, деревня, ремесленная мастерская).

Осложнение (2–3 предложения): Возникает препятствие, соответствующее проблеме клиента (тупик, потеря, страх, запрет).

Встреча с помощником (1–2 предложения): Герой встречает фигуру, которая не даёт прямого ответа, но задаёт вопрос или даёт символический предмет. Эта фигура должна соответствовать архетипу, который нуждается в активации (старый мудрец, добрая женщина, странный ребёнок).

Инсайт/Трансформация (1–2 предложения): Герой сам находит решение (никто не решает за него). Решение всегда является символическим аналогом того шага, который должен сделать клиент.

Возвращение (1 предложение): Герой возвращается домой или в исходную точку, но изменённым.

Техника 1. «Метафора-калибровка» (для архетипа Матери)

Таблица 1

| Клиентский запрос         | Архетипический адрес | Готовая метафорическая форма                                                                                                                                                                  |
|---------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| «Меня никто не любит»     | Мать (дефицит)       | История про котёнка, которого подобрала старая кошка. Кошка не говорит «ты хороший», она просто греет его своим телом.                                                                        |
| «Я должен быть идеальным» | Мать (негативная)    | История про садовника, который поливал один цветок больше других. Цветок вырос, но завял от избытка внимания. Тогда садовник понял: любовь — это не количество воды, а умение вовремя отойти. |

Техника 2. «Метафора-граница» (для архетипа Отца)

Таблица 2

| Клиентский запрос   | Архетипический адрес       | Готовая метафорическая форма                                                                                                                                                                                              |
|---------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| «Мной пользуются»   | Отец (дефицит)             | История про забор, который построил старый плотник. Забор был невысоким, но очень прочным. Плотник сказал: «Хороший забор не тот, который всех пугает, а тот, который знает, кого впускать».                              |
| «Я боюсь ошибиться» | Отец (гиперактивированный) | История про учителя, который ставил двойки за малейшую ошибку. Один ученик спросил: «А вы сами никогда не ошибались?» Учитель помолчал и сказал: «Ошибался. И теперь я понимаю: ошибка — это не конец пути, а его часть». |

Техника 3. «Метафора-трансформация» (для архетипа Ребёнка)

Таблица 3

| Клиентский запрос             | Архетипический адрес    | Готовая метафорическая форма                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| «Я потерял интерес к жизни»   | Ребёнок (блокированный) | История про семечко, которое лежало в тёмном чулане. Оно думало, что оно просто семечко и ничего больше. Но однажды его посадили в землю, и оно стало расти. Оно не знало, кем станет — дубом или репейником, — но ему стало интересно. |
| «Я чувствую себя беспомощным» | Ребёнок (дефицитарный)  | История про птенца, который выпал из гнезда. Он лежал на земле и боялся. Мимо проходил старый ворон и сказал: «Ты не беспомощный. Ты просто ещё не знаешь, что умеешь летать».                                                          |

Техника 4. «Метафора-инсайт» (для архетипа Мудреца)

Таблица 4

| Клиентский запрос              | Архетипический адрес   | Готовая метафорическая форма                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| «Я не знаю, как поступить»     | Мудрец (блокированный) | История про человека, который искал ответ у всех мудрецов. Один старый монах сказал ему: «Ты ищешь ответ снаружи, а он — внутри. Задай себе вопрос перед сном, и ответ придёт утром. Не думай — просто жди». |
| «Меня мучают навязчивые мысли» | Мудрец (негативный)    | История про радио, которое играло слишком громко. Человек пытался его выключить, но оно не выключалось. Тогда он просто сделал звук тише. Он не убрал радио, но оно перестало мешать.                        |

Шаг 5. Подача метафоры.

Метафора никогда не предъявляется как «вот история про вас». Она подаётся как:

«Я вспомнил одну старую притчу...»

«Мне пришла в голову одна история...»

«Один мой знакомый рассказывал...»

Важно, чтобы голос психолога был спокойным, ритмичным, без интонаций «значимости» (это усиливает трансовый эффект).

Практические техники конструирования метафор для различных архетипов

Техника 5. «Метафора-выбор» (для архетипа Героя)

Таблица 5

| Клиентский запрос             | Архетипический адрес  | Готовая метафорическая форма                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| «Я боюсь начать новое дело»   | Герой (блокированный) | История про человека, который стоял на берегу реки и боялся переплыть. Он ждал идеального момента, но момент не наступал. Тогда он сделал шаг. Вода была холодной, но он переплыл. Оказавшись на другом берегу, он понял: страх был только до первого шага. |
| «Я сдаюсь, не доходя до цели» | Герой (дефицитарный)  | История про бегуна, который останавливался за сто метров до финиша. Тренер сказал ему: «Ты боишься не финиша. Ты боишься того, что будет после. А после – просто отдых. Разреши себе финишировать».                                                         |

Дефицитарный – это прилагательное, обозначающее нехватку, неполноценность, недостаток чего-либо или состояние, при котором наблюдается дефицит.

Техника 6. «Метафора-интеграция» (для архетипа Тени)

Таблица 6

| Клиентский запрос          | Архетипический адрес | Готовая метафорическая форма                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| «Меня бесит этот человек»  | Тень (проекция)      | История про охотника, который преследовал волка много лет. Однажды волк обернулся и сказал: «Ты гонишься не за мной. Ты гонишься за той частью себя, которую боишься признать». Охотник остановился, посмотрел на волка – и узнал в нём свою собственную ярость, которую он всегда подавлял. |
| «Я ненавижу свою слабость» | Тень (отвержение)    | История про рыцаря, который считал себя сильным и бесстрашным. Он изгонял из своего замка любого, кто проявлял страх. Однажды старый слуга сказал ему: «Твой страх не враг. Это страж, который не пускает к тебе настоящую опасность. Прогонишь стража – придёт беда».                       |

Методические рекомендации для психолога

На основе обобщения практического опыта [4; 6; 7; 10] формулируются следующие рекомендации:

Не использовать метафору как «готовый рецепт». Приведённые выше метафоры – это шаблоны, которые необходимо адаптировать под язык и образы конкретного клиента. Если клиент говорит о «болоте», не используйте метафору «пустыни» – используйте метафору «болота».

Соблюдать принцип «одна метафора – один архетип». Не пытайтесь в одной истории активировать одновременно Мать, Отца и Героя. Это создаст шум и снизит эффективность.

Оставлять пространство для бессознательного. Метафора не должна быть «разжёванной». Лучше закончить историю открытым вопросом: «И тогда он понял, что...» – и дать клиенту самому мысленно завершить фразу.

Таблица 7

Сводная таблица: клиентский запрос → архетип → метафорический сценарий

| Типичный запрос клиента     | Диагностированный архетип  | Метафорический сценарий             |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| «Я чувствую себя одиноким»  | Мать (дефицит)             | История о принятии без условий      |
| «Меня все критикуют»        | Отец (гиперактивированный) | История о смягчении закона          |
| «Я ничего не хочу»          | Ребёнок (блокированный)    | История о пробуждении интереса      |
| «Я не могу принять решение» | Мудрец (блокированный)     | История о доверии к интуиции        |
| «Я боюсь первого шага»      | Герой (блокированный)      | История о преодолении страха        |
| «Меня бесит этот человек»   | Тень (проекция)            | История о возвращении проекции      |
| «Я потерял смысл жизни»     | Самость (дефицитарная)     | История о мандале/круге/целостности |

Наблюдать за реакцией клиента. Если во время рассказа метафоры клиент напрягается, ёрзает, закрывает глаза – это знак, что метафора «попала». Если клиент

остаётся полностью расслабленным и нейтральным – вероятно, архетипический адрес выбран неверно.

Не интерпретировать метафору. Никогда не говорите клиенту: «Эта история о том, что тебе нужно...». Метафора работает только тогда, когда клиент сам делает вывод (часто бессознательно).

Использовать метафору многократно. Одну и ту же метафору можно рассказывать разными словами в разных сессиях. Бессознательное клиента будет углублять резонанс с каждым повтором.

Выводы:

Коллективное бессознательное является не абстрактной философской категорией, а практическим инструментом для психолога, работающего с эриксоновскими метафорами. Универсальность архетипических образов позволяет достигать терапевтического эффекта у клиентов с разным культурным и личным опытом.

Предложенный алгоритм построения архетипической метафоры может служить методической основой для обучения психологов технике косвенного внушения.

Разработанная типология метафор для шести основных архетипов (Мать, Отец, Ребёнок, Мудрец, Герой, Тень) охватывает наиболее частые психологические ситуации и может использоваться как «банк метафор» в практической работе.

Сформулированные методические рекомендации позволяют минимизировать типичные ошибки начинающих психологов: излишнюю интерпретацию, директивность, использование неадаптированных шаблонов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Юнг К.Г. Архетип и символ / Пер. с нем. – М.: Ренессанс, 1991. – 304 с.
2. Юнг К.Г. Душа и миф. Шесть архетипов / Пер. с англ. – М.: АСТ, 2019. – 400 с.
3. Франц М.-Л. фон. Архетипические паттерны в волшебных сказках / Пер. с англ. – М.: Класс, 2007. – 288 с.
4. Эриксон М. Мой голос останется с вами: Обучающие истории / Пер. с англ. – СПб.: Петербург-XXI век, 1995. – 254 с.
5. Эриксон М., Росси Э., Росси Ш. Гипнотические реальности: наведение клинического гипноза и формы косвенного внушения / Пер. с англ. – М.: Класс, 1999. – 352 с.
6. Хейли Дж. Милтон Эриксон. Целительные истории / Пер. с англ. – М.: Класс, 2001. – 256 с.
7. Гордеев М.Н. Классический и эриксоновский гипноз: практическое руководство. – М.: Издательство Института психотерапии, 2005. – 232 с.
8. Пропп В.Я. Морфология волшебной сказки. – М.: Лабиринт, 2001. – 192 с.
9. Гинзбург М.Р., Яковлева Е.Л. Эриксоновский гипноз. Систематический курс. – М.: Класс, 2008. – 208 с.
10. Бэндлер Р., Гриндер Дж. Наведение транса / Пер. с англ. – М.: Прозерпина, 1995. – 302 с.

УДК 159.99

Пестряева<sup>1</sup> С.Ю.

<sup>1</sup> Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия  
<sup>1</sup> pesveta@gmail.com

## АРХЕТИП ТЕНИ В ЭРИКСОНОВСКИХ МЕТАФОРАХ: ОТ ДЕМОНИЗАЦИИ К ИНТЕГРАЦИИ

**Аннотация.** Рассматривается архетип Тени в эриксоновском гипнозе как трансформируемый образ, который в метафорической форме переходит от его демонизации и отвержения к осознанной интеграции. Показано, как эриксоновские метафоры «разводят» агрессию и запретные содержания Тени через образы злого героя, «темного двойника» или «опасного спутника», а затем включают их в конструктивную динамику сюжета, позволяя клиенту пережить принятие и использование теневого потенциала без внутреннего разрушения.

**Ключевые слова:** архетип Тени, эриксоновские метафоры, осознанная интеграция

Pestryaeva<sup>1</sup> S.U.

<sup>1</sup> Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russia  
<sup>1</sup> pesveta@gmail.com

## THE SHADOW ARCHETYPE IN ERICKSON'S METAPHORS: FROM DEMONIZATION TO INTEGRATION

**Abstract.** The article deals with the Shadow archetype in Ericksonian hypnosis as a transformable image that metaphorically transitions from demonization and rejection to conscious integration. It demonstrates how Ericksonian metaphors "dissolve" the aggression and forbidden contents of the Shadow through images of an evil hero, a "dark double," or a "dangerous companion," and then incorporate them into the constructive dynamics of the plot, allowing the client to experience the acceptance and use of their shadow potential without internal destruction.

**Keywords:** Shadow archetype, Ericksonian metaphors, conscious integration

В классической юнгианской психологии Тень (лат. umbra) определяется как совокупность тех психических содержаний, которые несовместимы с сознательной установкой Эго и поэтому вытесняются в бессознательное [1, с. 89]. В традиционной психологии Тень часто воспринимается как нечто негативное, подлежащее устранению или ослаблению. Однако в эриксоновском подходе, Тень рассматривается не как враг, а как источник ресурса, требующий не подавления, а интеграции.

В статье проведен анализ того, как архетип Тени может быть активирован и перенаправлен через эриксоновские метафоры – от состояния «демонизации» (восприятия Тени как зла, слабости, греха) к состоянию «интеграции» (принятия Тени как источника силы, творчества, аутентичности).

**Теоретическая рамка: структура Тени по Юнгу и её проявления**

Согласно Юнгу, Тень имеет два основных слоя [2, с. 134–145]:

| Слой Тени                | Характеристика                                                                                         | Пример                                                                            | Психологическая задача                             |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Личная Тень</b>       | Вытесненные индивидуальные качества (агрессия, зависть, эгоизм, лень, страх)                           | «Я не злюсь, я просто устаю» (при этом гнев вырывается в виде пассивной агрессии) | Осознание и принятие вытесненных качеств как своих |
| <b>Коллективная Тень</b> | Проекция групповых, культурных, исторических негативных содержаний (часто связана с архетипом «врага») | «Все мужчины – козлы», «все чиновники – воры»                                     | Снятие проекций, возвращение «тени» себе           |

В контексте эриксоновской терапии наиболее значима **личная Тень**, однако коллективная Тень также может проявляться в метафорах клиента и требовать работы.

**Ключевое юнгианское положение:** Тень не исчезает при интеграции, она **меняет знак** с негативного на позитивный. Подавленная агрессия становится ассертивностью и способностью говорить «нет». Подавленная зависимость – способностью к глубокой привязанности. Подавленный эгоизм – здоровой заботой о своих границах [3, с. 78].

**Эриксоновская стратегия работы с Тенью через метафору**

Эриксон не боролся с проявлениями Тени, а **использовал их форму** как канал для доставки ресурса. На основе анализа клинических случаев [4; 5] и методических работ [6; 7] может быть выделена следующая последовательность шагов:

**Шаг 1. Идентификация Тени в метафорах клиента.**

Психолог внимательно слушает, какие образы, сравнения, истории спонтанно использует клиент для описания своей проблемы. Эти метафоры являются «ключами» к Тени.

**Шаг 2. Присоединение к Тени через валидацию её функции.**

Вместо того чтобы говорить «это плохо, давай это уберём», Психолог признаёт, что у Тени есть позитивное намерение (часто — защита Эго от боли).

|                                 |                                                 |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| Типичная метафора клиента       | Проявление Тени                                 |
| «Меня разрывает изнутри»        | Подавленная агрессия                            |
| «Я как будто в клетке»          | Подавленное желание свободы, страх выйти        |
| «Я пустой, как выжженная земля» | Подавленная жизненная сила, депрессия           |
| «За мной кто-то бежит»          | Проекция собственной тревоги или агрессии вовне |

Пример (из реконструкции Дж. Хейли) [6, с. 112]:

Клиент: «Я не могу остановиться — я всё время думаю о том, как кто-то меня обидел. Это навязчивое состояние».

Эриксон (через метафору): «У одного человека был сторожевой пёс, который лаял каждую ночь. Сначала хозяин злился. А потом понял: пёс лает не потому, что злой, а потому, что хочет защитить дом. Тогда хозяин научился благодарить пса, и пёс стал лаять только тогда, когда реально приходил вор».

### **Шаг 3. Перекодирование Тени через метафору «другого смысла».**

Форма проявления Тени (например, навязчивое повторение, гнев, страх) сохраняется, но её **значение** меняется. То, что было симптомом, становится сигналом.

Пример метафоры для перекодирования подавленной агрессии:

«В одном лесу жил огонь. Он сжигал всё вокруг, и звери боялись его. Но однажды пришёл старый шаман и сказал: "Огонь, твоя сила — не в том, чтобы сжигать. Твоя сила — в том, чтобы давать тепло и свет. Просто ты не знал, как иначе". И тогда огонь научился гореть ровно, в очаге, и звери стали приходить к нему греться. А если приходил хищник — огонь снова становился большим, чтобы защитить».

### **Шаг 4. Интеграция и закрепление нового образа Тени.**

Клиенту предлагается (в трансе или в повседневной жизни) «встретиться» со своей Тенью в новом качестве — как с союзником, а не врагом.

#### **Клинический пример: метафора для интеграции Тени «неудачника»**

**Клиент:** Женщина, 38 лет, фрилансер-дизайнер.

**Запрос:** Хроническая тревога, страх брать новые заказы, убеждение «я всё испортичу, я недостаточно хороша».

**Юнгианская диагностика:** Тень в данном случае — это вытесненная **гордость** и **амбиция**. Эго идентифицирует себя с «скромной, удобной, хорошей девочкой». Тень же содержит убеждение «я талантлива, я хочу признания, я могу быть лучше других». Поскольку это качество несовместимо с «хорошей девочкой», оно вытесняется и проявляется как тревога и самообесценивание [8, с. 89].

#### **Эриксоновская метафора (фрагмент):**

«В одном городе жил художник. Он очень хотел писать картины, но боялся, что они будут плохими. Каждый раз, когда он брал кисть, внутри появлялся маленький голос: "Кому это нужно? Ты не Рембрандт". Художник слушал этот голос и откладывал кисть».

Однажды он пришёл к старому мастеру. Мастер сказал: "Ты боишься не того, что у тебя не получится. Ты боишься того, что *получится*. Потому что если получится — придётся признать, что ты художник. А признать это страшно: тогда надо будет работать, отвечать, быть видимым".

Художник задумался. А мастер продолжил: "Внутри тебя сидит не критик. Внутри тебя сидит **охранитель**. Он говорит "не рискуй", чтобы тебя не отвергли. Но если ты скажешь ему: "Спасибо, я услышал, теперь я сам", — он уйдёт в сторону и будет просто наблюдать. И тогда ты сможешь рисовать. Сначала маленькие рисунки. Для себя. А потом — большие. Для всех".»

**Анализ механизма:** Метафора не борется с убеждением «я недостаточно хороша». Она **переопределяет** источник этого убеждения: это не «объективная оценка» (которую Эго принимает), а «голос охранителя» (проекция Тени, которую можно поблагодарить и отпустить). Тень «гордость» не изгоняется, а **принимается** как «талант, который боится проявиться». Интеграция происходит через признание: да, я хочу быть видимой, и это нормально.

**Результат (по отчёту клиента через 1 месяц):** Клиентка взяла два крупных заказа, впервые за три года. Отмечает: «Странно, но когда появляется страх, я теперь говорю себе: "А, это мой охранитель. Спасибо, я поняла". И страх... не уходит, но перестаёт парализовать. Я просто делаю, несмотря на него».

#### **Типология эриксоновских метафор для работы с различными гранями Тени**

На основе анализа клинических случаев Эриксона и его последователей [4; 5; 6; 9] может быть предложена следующая классификация:

**Выводы:**

Архетип Тени не является «злом», которое необходимо устранить. Это **источник жизненной силы**, который при неправильном обращении становится деструктивным, а при правильном – ресурсным [10, с. 212].

| Грань Тени                       | Типичное проявление                                                  | Тип метафоры               | Ключевой образ                                                                             | Психологическая цель                                    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Подавленная агрессия</b>      | Пассивная агрессия, психосоматика, внезапные вспышки                 | «Метафора огня/зверя»      | Огонь в очаге, сто-рожевой пёс, горная река                                                | Направить агрессию на защиту границ, а не на разрушение |
| <b>Подавленная гордость</b>      | Самообесценивание, синдром самозванца, страх успеха                  | «Метафора спящего таланта» | Художник, который боится кисти; дерево, которое не цветёт, потому что боится солнца        | Принять своё право на признание, не боясь отвержения    |
| <b>Подавленная зависимость</b>   | Гиперконтроль, неспособность просить о помощи, выгорание             | «Метафора моста/опоры»     | Дом, который держится на одной стене; странник, который учится принимать воду из чужих рук | Разрешить себе быть уязвимым и принимать поддержку      |
| <b>Подавленная сексуальность</b> | Подавление желаний, стыд, перверсии                                  | «Метафора реки/танца»      | Подземный родник, который пробивается наружу; танец, который танцуют в темноте             | Принять телесные желания как естественную часть жизни   |
| <b>Подавленная Тень «тени»</b>   | Излишняя толерантность к насилию, отсутствие гнева там, где он нужен | «Метафора спящего воина»   | Старый меч в ножнах, который помнят только старики                                         | Вернуть право на праведный гнев и самозащиту            |

**Сравнительный анализ: работа с Тенью в классическом юнгианском подходе и в эриксоновском гипнозе**

| Параметр           | Юнгианский анализ                                                        | Эриксоновский гипноз (через метафору)                                   |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Основной метод     | Активная имажинация, анализ сновидений, рисунков                         | Косвенное внушение, метафора, трансовое состояние                       |
| Роль Психолога     | Переводчик символов, проводник                                           | Рассказчик, «садовник», создающий условия для роста                     |
| Скорость изменений | Относительно медленная (месяцы – годы)                                   | Относительно быстрая (недели – месяцы)                                  |
| Глубина работы     | Глубокая (достигает архетипических слоёв)                                | Глубокая (через метафору активизирует те же архетипы)                   |
| Риски              | Слишком медленно для острых состояний; требует высокой рефлексии клиента | Слишком «магично» для некоторых клиентов; риск зависимости от Психолога |
| Преимущество       | Даёт язык для понимания себя                                             | Даёт опыт изменения без понимания «как»                                 |

Эриксоновские метафоры позволяют осуществить интеграцию Тени **минуя сознательное сопротивление** Эго. Клиент не должен «признавать» свои вытесненные качества вербально – достаточно того, что бессознательное «узнает» их в метафорическом образе.

Предложенная типология метафор для различных граней Тени может служить **практическим руководством** для психолога, работающего в эриксоновской или интегративной парадигме.

Интеграция Тени через метафору является примером **трансдисциплинарного подхода**, объединяющего юнгианскую глубину, эриксоновскую технику и нарративный коучинг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнг К.Г. AION. Исследование феноменологии самости / Пер. с англ. – М.: Рефл-бук, 1997. – 336 с.
2. Юнг К.Г. Отношения между Эго и бессознательным / Пер. с нем. – М.: Академический проект, 2019. – 256 с.
3. Нойманн Э. Происхождение и развитие сознания / Пер. с англ. – М.: Рефл-бук, 1998. – 464 с.
4. Эриксон М. Мой голос останется с вами: Обучающие истории / Пер. с англ. – СПб.: Петербург-XXI век, 1995. – 254 с.

5. Эриксон М., Росси Э., Росси Ш. Гипнотические реальности: наведение клинического гипноза и формы косвенного внушения / Пер. с англ. — М.: Класс, 1999. — 352 с.
6. Хейли Дж. Необычайная психотерапия. Психопсихологические техники Милтона Эриксона / Пер. с англ. — СПб.: Белый кролик, 1995. — 381 с.
7. Гордеев М.Н. Классический и эриксоновский гипноз: практическое руководство. — М.: Издательство Института психотерапии, 2005. — 232 с.
8. Юнг К.Г. Психология бессознательного / Пер. с нем. — М.: Канон, 1994. — 320 с.
9. Эриксон М., Росси Э. Гипнотерапия. Практическое руководство / Пер. с англ. — М.: Класс, 2006. — 352 с.
10. Франц М.-Л. фон. Тень и зло в волшебных сказках / Пер. с англ. — М.: Класс, 2010. — 272 с.

**Пестряева<sup>1</sup> С.Ю.**

<sup>1</sup> Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия  
<sup>1</sup> pesveta@gmail.com

### **АРХЕТИПЫ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МЕТАФОРЫ: ЮНГИАНСКИЕ ОСНОВАНИЯ ЭРИКСОНОВСКОЙ ТЕХНИКИ КОСВЕННОГО ВНУШЕНИЯ**

**Аннотация.** Архетипы рассматриваются как универсальные метафоры психики, лежащие в основе эриксоновской техники косвенного внушения. Показано, как юнгианская модель коллективного бессознательного и архетипических образов (Герой, Тень, Мудрец, Мать и др.) поддерживает эриксоновскую практику метафорического повествования: истории и наводящие формулировки опираются на общечеловеческие сюжеты и образы, которые автоматически активируют глубинные когнитивно-эмоциональные паттерны, минуя рациональное сопротивление. Анализ подчеркивает, что эриксоновский косвенный стиль внушения встроен в юнгианскую логику — архетипы выступают не только как содержание коллективного бессознательного, но и как готовые метафорические схемы, через которые возможно мягкое переструктурирование переживания и поведения клиента.

**Ключевые слова:** архетипы, универсальные метафоры, когнитивно-эмоциональные паттерны

**Pestryaeva<sup>1</sup> S.U.**

<sup>1</sup> Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russia  
<sup>1</sup> pesveta@gmail.com

### **ARCHETYPES AS UNIVERSAL METAPHORS: JUNGIAN FOUNDATIONS OF ERICKSON'S TECHNIQUE OF INDIRECT SUGGESTION**

**Abstract.** The article deals with the archetypes as "universal metaphors" of the psyche, underlying Erickson's technique of indirect suggestion. It demonstrates how Jung's model of the collective unconscious and archetypal images (Hero, Shadow, Sage, Mother, etc.) support Erickson's practice of metaphorical storytelling: stories and suggestive formulations draw on universal human plots and images that automatically activate deep cognitive-emotional patterns, bypassing rational resistance. The analysis emphasizes that Erickson's indirect suggestion style is embedded in Jungian logic—archetypes act not only as contents of the collective unconscious, but also as ready-made metaphorical schemas through which a gentle restructuring of the client's experience and behavior is possible.

**Keywords:** archetypes, universal metaphors, cognitive-emotional patterns

В статье выдвигается и обосновывается следующая гипотеза: эффективность эриксоновских метафор обусловлена их способностью активировать архетипические структуры коллективного бессознательного (по Юнгу), минуя сознательную цензуру Эго [1, с. 89; 2, с. 156]. Архетип, таким образом, выступает как «универсальная метафора», а индивидуальная эриксоновская метафора — как «канал», через который архетипическая энергия доставляется в личное бессознательное клиента [3, с. 203].

Теоретическое основание: архетип как форма без содержания

Согласно К.Г. Юнгу, архетип не является конкретным образом (образ матери, старца, героя), а представляет собой трансперсональный паттерн, формальную матрицу, которая организует опыт, но сама по себе не имеет содержания [4, с. 112]. Метафора, используемая Юнгом: архетип — это «русло реки», а личный опыт — «вода», которая, протекая по руслу, приобретает форму. Русло существует до воды, но становится видимым только тогда, когда вода (конкретный образ, переживание) его заполняет.

Механизм активации архетипа через эриксоновскую метафору

Эриксон не использовал юнгианскую терминологию в своей работе, однако анализ его клинических историй показывает, что он интуитивно применял принцип «резонанса с архетипом» [6, с. 211]. Механизм может быть описан следующими этапами: Этап 1. Сенсбилизация (создание «голода» по архетипу).

Психолог через косвенные внушения и наблюдение за клиентом выявляет, какой архетипический паттерн в данный момент нарушен. Например, клиент с чувством «я никому не нужен» имеет нарушенный архетип Матери (негативный опыт принятия) или архетип Отца (отсутствие защиты и структуры).

Этап 2. Предъявление метафоры как «архетипического ключа».

Метафра не объясняет, а показывает в образной форме, как архетип «должен» работать. При этом сознание клиента воспринимает историю как «просто интересный рассказ», а бессознательное «узнаёт» в ней архетипическую структуру [7, с. 134].

Этап 3. Заполнение архетипической формы личным содержанием.

Бессознательное клиента автоматически «подставляет» в предложенную метафору свой личный опыт, не подвергая его сознательной критике. Например, метафора про «дерево, которое росло в тени, а потом потянулось к солнцу» не содержит ни одного конкретного воспоминания клиента, но бессознательное само найдёт соответствующий опыт и «перепишет» его с новым эмоциональным знаком.



Основные архетипы, релевантные для коучинговой практики [5, с. 67–89]:

Таблица 1

| Архе-тип     | Сущность                                | Позитивное проявление                     | Негативное проявление (Тень архетипа)         |
|--------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Мать         | Принятие, забота, питание               | Безусловная любовь, поддержка             | Поглощение, гиперопека, критика               |
| Отец         | Порядок, закон, границы                 | Защита, структура, наставничество         | Авторитаризм, подавление, холодность          |
| Ребёнок      | Потенциал, рождение, уязвимость         | Спонтанность, творчество, надежда         | Инфантильность, беспомощность, отрицание      |
| Мудрец       | Знание, смысл, интуиция                 | Понимание, совет, прозрение               | Догматизм, манипуляция, оторванность от жизни |
| Герой        | Борьба, преодоление, подвиг             | Смелость, достижение, защита слабых       | Агрессия, нарциссизм, обесценивание других    |
| Тень         | Вытесненное, не-принятое                | Ресурсная сила, творчество, инстинкты     | Деструкция, проекция, саморазрушение          |
| Анима/Анимус | Внутренняя женственность/мужественность | Связь с эмоциями, креативность, отношения | Настроенность, одержимость, конфликт          |
| Самость      | Целостность, центр психики              | Ощущение единства, смысла, предназначения | Раздутое Эго, ложная духовность               |

Этап 4. Интеграция и трансформация.

Активированный архетип начинает оказывать своё организующее влияние на психику. Нарушенный паттерн исцеляется «изнутри», без сознательных усилий клиента.

Классификация эриксоновских метафор по архетипическому адресу

На основе анализа клинических случаев М. Эриксона [8; 9] и их реконструкций Дж. Хейли [6] и Э. Росси [2], предлагается следующая классификация:

Таблица 2

| Архетипический адрес  | Тип метафоры                       | Эриксоновская техника (пример)                                                            | Психологическая цель                                |
|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Мать (принятие)       | «Метафора безусловного тепла»      | История про кошку, которая греет котят, даже если они шалят                               | Снижение самокритики, исцеление стыда               |
| Отец (границы)        | «Метафора мудрого запрета»         | История про забор, который защищает сад, а не тюрьму                                      | Формирование здоровых границ, борьба с тревогой     |
| Ребёнок (потенциал)   | «Метафора спящего семени»          | История про жёлудь, который лежит в земле и ждёт своего часа                              | Работа с апатией, депрессией, отсутствием мотивации |
| Мудрец (интуиция)     | «Метафора внутреннего знания»      | «Твоё тело знает то, что сознание забыло...»                                              | Доверие к себе, работа с психосоматикой             |
| Герой (преодоление)   | «Метафора трудного пути»           | История про человека, который переплыл реку, потому что не мог её обойти                  | Фобии, травмы, принятие неизбежного                 |
| Тень (интеграция)     | «Метафора непризнанного сокровища» | История про подвал, в котором хранятся старые, но очень ценные вещи                       | Работа с подавленной агрессией, стыдом, завистью    |
| Самость (целостность) | «Метафора оркестра»                | История про дирижёра, который слышит все инструменты сразу, даже если некоторые фальшивят | Экзистенциальный кризис, поиск смысла               |

Пример: метафора для активации архетипа Мудреца

Клиент: Мужчина, 45 лет, инженер.

Запрос: Хроническая бессонница, навязчивые мысли перед сном («как я облажался сегодня», «что будет завтра»).

Юнгианская диагностика: Нарушен контакт с архетипом Мудреца. Это пытается «решать проблемы» сознательным анализом, но это только усиливает тревогу. Бессознательное «знает» ответ, но Эго ему не доверяет [10, с. 45].

Эриксоновская метафора (фрагмент трансовой сессии):

«В одном старом доме жил часовщик. Он очень любил свои часы. Он мог починить любую шестерёнку, любой механизм. Но он заметил одну странность: когда он пытался заснуть, его мозг продолжал "чинить" – считать зубчики, проверять пружины. И он не мог уснуть.

Тогда он придумал ритуал. Перед сном он клал свои руки на стол и говорил: "Дорогие руки, вы сегодня отлично поработали. А теперь – отдых. Часы подождут до утра. Моё бессознательное знает, когда что чинить, лучше меня".

И странное дело... когда он переставал заставлять себя не думать о часах... они начинали тикать сами... ровно... спокойно... И он засыпал под этот ровный тихий звук...»

Анализ: Метафора не содержит прямого внушения «не думай», не объясняет механизмы бессонницы. Она активизирует архетип Мудреца через образ часовщика (мудрый мастер, который знает меру). Клиентское бессознательное само делает перенос: «Я – как тот часовщик. Я могу доверить свои "механизмы" себе же, но не сознательно, а бессознательно». Бессонница ушла через 2 недели (по отчёту клиента).

Сравнительный анализ: прямая аффирмация vs архетипическая метафора Таблица 3

| Параметр                | Прямая аффирмация                            | Архетипическая метафора                                    |
|-------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Адресат                 | Сознание (Эго)                               | Бессознательное (архетип)                                  |
| Язык                    | Логические утверждения («я спокоен»)         | Образы, символы, истории                                   |
| Защитный фильтр         | Включает критику («это неправда»)            | Обходит критику («это просто сказка»)                      |
| Источник изменения      | Волевое усилие                               | Спонтанная реорганизация                                   |
| Устойчивость результата | Низкая (быстрое возвращение симптома)        | Высокая (архетип остаётся активированным)                  |
| Риск                    | Усиление внутреннего конфликта (Эго vs Тень) | Минимальный (метафора просто «предлагает», а не «требует») |

Выводы:

Эриксоновская метафора является не просто риторическим приёмом, а психотехническим инструментом, который активизирует архетипические структуры коллективного бессознательного [11, с. 78].

Различные архетипы (Мать, Отец, Мудрец, Герой, Самость) требуют различных типов метафор. Предложенная классификация может служить практическим руководством для психолога.

Механизм «архетипического резонанса» объясняет, почему эриксоновские метафоры эффективны даже в тех случаях, когда прямые внушения и когнитивные техники бессильны (фобии, травмы, психосоматика).

Интеграция юнгианской теории архетипов и эриксоновской практики метафоры открывает перспективу для создания универсальной трансперсональной модели, в которой сознательное и бессознательное, личное и коллективное, индивидуальное и универсальное перестают быть противоположностями и начинают работать как единая система [12, с. 301].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнг К.Г. Душа и миф. Шесть архетипов / Пер. с англ. – М.: АСТ, 2019. – 400 с.
2. Эриксон М., Росси Э. Гипнотерапия. Практическое руководство / Пер. с англ. – М.: Класс, 2006. – 352 с.
3. Хейли Дж. Необычная психотерапия. Психотерапевтические техники Милтона Эриксона / Пер. с англ. – СПб.: Белый кролик, 1995. – 381 с.
4. Юнг К.Г. Архетип и символ / Пер. с нем. – М.: Ренессанс, 1991. – 304 с.
5. Нойманн Э. Происхождение и развитие сознания / Пер. с англ. – М.: Рефл-бук, 1998. – 464 с.
6. Хейли Дж. Милтон Эриксон. Целительные истории / Пер. с англ. – М.: Класс, 2001. – 256 с.
7. Гордеев М.Н. Классический и эриксоновский гипноз: практическое руководство. – М.: Издательство Института психотерапии, 2005. – 232 с.
8. Эриксон М. Мой голос останется с вами: Обучающие истории / Пер. с англ. – СПб.: Петербург-XXI век, 1995. – 254 с.
9. Эриксон М., Росси Э., Росси Ш. Гипнотические реальности: наведение клинического гипноза и формы косвенного внушения / Пер. с англ. – М.: Класс, 1999. – 352 с.
10. Юнг К.Г. Отношения между Эго и бессознательным / Пер. с нем. – М.: Академический проект, 2019. – 256 с.
11. Франц М.-Л. фон. Архетипические паттерны в волшебных сказках / Пер. с англ. – М.: Класс, 2007. – 288 с.
12. Франкл В. Человек в поисках смысла / Пер. с нем. – М.: Прогресс, 1990. – 368 с.

УДК 621.3.095

**Кочеткова<sup>1</sup> К.Д., Гришко<sup>2</sup> А.К., Янгазова<sup>3</sup> Э.Р., Зайцев<sup>4</sup> Е.И.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,3</sup> kochetkova504@mail.ru

<sup>2,4</sup> alexey-grishko@rambler.ru

## **КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ**

**Аннотация.** Переменные резисторы являются одним из основных элементов в радиоэлектронике. Переменные резисторы есть не только в электроприборах и специализированной технике, но и в бытовых приборах, которые постоянно окружают нас и без которых мы не можем обойтись в повседневной жизни. Рассмотрены основные виды переменных резисторов: проволочные и непроволочные. Рассмотрены и нормативные документы для контроля проверки количественных и качественных характеристик переменных резисторов.

**Ключевые слова:** переменные резисторы, параметры, радиоэлементы, потенциометры, сопротивление, прецизионные резисторы, проволочные резисторы, контроль, нормативные документы

**Kochetkova<sup>1</sup> K.D., Grishko<sup>2</sup> A.K., Yangazova<sup>3</sup> E.R., Zaitsev<sup>4</sup> E.I.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,3</sup> kochetkova504@mail.ru

<sup>2,4</sup> alexey-grishko@rambler.ru

## **CLASSIFICATION AND DIAGNOSTICS OF VARIABLE RESISTORS**

**Abstract.** Variable resistors are one of the main elements in radio electronics. Variable resistors are not only found in electrical appliances and specialized equipment, but also in household appliances that surround us on a daily basis and are essential for our daily lives. In this article, we will explore the main types of variable resistors, including wire-wound and non-wire-wound resistors. We will also discuss the regulatory documents for monitoring the quantitative and qualitative characteristics of variable resistors.

**Keywords:** variable resistors, parameters, radio components, potentiometers, resistance, precision resistors, wire resistors, control, regulatory documents

Резисторами переменного сопротивления называют элемент радиоаппаратуры, имеющий корпус цилиндрической или параллелепипедальной формы, материал которого может быть изготовлен, к примеру, из металла, а именно алюминия или латуни, а также из изоляционных материалов, с помощью которых можно изменять сопротивление в определенных диапазонах. Переменные резисторы также называются пассивным элементом электрических цепей.

Существует множество классификаций переменных резисторов: по способу управления, по принципу действия, по количеству контактов, по конструкции резистивного элемента [1-4]. Отдельно от этой классификации выделяют потенциометры, реостаты и подстроечные резисторы.

Потенциометрами являются те резисторы, которые имеют три вывода и сопротивление данных резисторов изменяется вручную, что является одним из главных его преимуществ. Этот трехвыводной переменный резистор функционирует, в качестве регулируемого делителя напряжения, а именно, на среднем выводе появляется напряжение, которое пропорционально положению регулируемого ползунка, при подаче напряжения на два крайних вывода. Потенциометры входят в особую группу прецизионных резисторов специального назначения. Потенциометры отличаются высокой точностью воспроизведения функциональной характеристики, именно поэтому их и включают в особую группу. Они применяются в вычислительных и измерительных устройствах и т. п.

В свою очередь реостатами называют устройство, которое состоит из проводящего элемента с устройством регулирования сопротивления. В отличие от потенциометра, реостат регулирует ток в цепи путем изменения величины сопротивления. Реостаты также имеют несколько видов: ползунковые, реохордовые, жидкостные и ламповые. В современной радиоэлектронике реостаты часто могут заменять на электронные регуляторы, в связи с практическим нулевым результатом потерь.

Отдельно от классификации вместе с потенциометрами и реостатами также выделяют и подстроечные резисторы. Данный пассивный электронный элемент предназначен для точной настройки заданных параметров радиоустройств в процессе его выпуска из производства, после монтажа или же в ходе ремонта [5-8]. Выделяется несколько типов подстроечных резисторов: по способу перемещения ползунка, по количеству оборотов, по типу резистивного элемента, а также по материалу резистивного слоя.

В зависимости от материала и конструкции резистивного элемента переменные резисторы делятся на проволочные и непроволочные. Последние, в свою очередь, подразделяются на композиционные, керметные, пластиковые, металлоокисные и металлизированные. Композиционные резисторы бывают пленочные и объемные. Их резистивный элемент выполняется на основе композиций, представляющих собой

гетерогенную систему из нескольких фаз, получаемую путем механического смешивания проводящего компонента (графита или сажи) с органическими или неорганическими связующими, наполнителя, пластификатора и отвердителя.

Резистивный элемент керметных резисторов представляет собой композиционный слой из диэлектрика и металла (окислов металлов). По существу, это тоже композиционные резисторы.

Рассмотрим подробнее положительные особенности проволочных резисторов. К положительным качествам данного пассивного элемента можно отнести: возможность изготовления резистора с малым допускаемым отклонением от номинального сопротивления; высокую стабильность параметров при воздействии различных внешних факторов (температуры, влажности и т.п.); малое значение ТКС и уровня собственных шумов; высокие термостойкость и перегрузочную способность [9-12]. Выше перечисленные особенности помогают обеспечить широкое использование проволочных резисторов в электронной аппаратуре, к которой предъявляются повышенные требования по точности и стабильности электрических и эксплуатационных параметров.

В настоящее время промышленность выпускает широкую гамму переменных проволочных резисторов с различным конструктивным исполнением. Основным элементом конструкций переменных проволочных резисторов является резистивный элемент, состоящий из провода (изолированного или неизолированного), намотанного на изоляционный каркас. Подвижной контакт перемещается по предварительно зачищенному (при использовании изолированной проволоки) участку резистивного элемента таким образом, что он касается следующего витка прежде, чем сходит с предыдущего, чтобы не нарушалось контактирование.

Основные электрические параметры проволочного резистора обусловлены свойствами резистивных и контактных материалов, используемых в его конструкции.

При производстве продукция на любом предприятии проходит контроль количественных и качественных характеристик свойств продукции или отдельных ее элементов. При контроле осуществляется проверка всех параметров, а также проверяется наличие или отсутствие дефектов, после чего выявляется допустимость тех или иных отклонений [13-16].

Проверка электрических параметров переменных резисторов осуществляется в соответствии с нормативными документами, к примеру ГОСТ 21342.0-75, а также с методиками измерений и требованиями к измерительному оборудованию. Основными методами контроля является: измерение сопротивления мультиметром, использование омметра, методом дифференциального измерения. Существуют также и требования к проведению измерений переменных резисторов. Данные требования описаны в таких нормативных документах, как: ГОСТ 21342.0 – общие требования при измерении электрических параметров переменных резисторов; ГОСТ 21342.1-87 – определение метода измерения переходного сопротивления контактов выключателя резистора.

Резисторы переменного назначения используются во всех сферах жизнедеятельности человека и остаются востребованными элементами электрических схем. Соблюдение нормативных требований на всех этапах проектирования до входного контроля и монтажа. Соблюдение ГОСТов позволяет гарантировать соответствие компонентов заявленных характеристик позволяет минимизировать риски отказов при реальных условиях эксплуатации элементов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Intellectual Method for Reliability Assessment of Radio-Electronic Means / N. K. Yurkov, A. K. Grishko, A. V. Lysenko [et al.] // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018, Saratov, 27-28 сентября 2018 года. – Saratov: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 105-112. – DOI 10.1109/APEDE.2018.8542360. – EDN WUCKOJ.
2. Management of the design parameters in optimal design problems / S. V. Klyuev, A. V. Klyuev, A. K. Grishko, S. V. Trukhanov // Materials Science Forum. – 2019. – P. 723-728. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.723. – EDN HOLPXG.
3. Problems of Equipment Control in Automatic Information-measuring Control Systems / N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko, I. M. Rybakov // IEEE Proceedings of 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 08-10 ноября 2023 года. – Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2023. – P. 535-541. – DOI 10.1109/SUMMA60232.2023.10349550. – EDN RWKIIV.
4. Качурина, К. С. Риски процесса контроля параметров переменного резистора / К. С. Качурина // Инжиниринг и технологии. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 60-62. – DOI 10.21685/2587-7704-2022-7-1-13. – EDN SAIZNM.
5. Гришко, А. К. Анизотропная модель системы измерения и анализа температурных полей радиоэлектронных модулей / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1(15). – С. 82-88. – EDN VWODKJ.
6. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems / A. Grishko, A. Lysenko, N. Yurkov [et al.] // Proceedings - 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBREIT 2019, Yekaterinburg, 25-26 апреля 2019 года. – Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 432-435. – DOI 10.1109/USBREIT.2019.8736570. – EDN MUDDKI.

7. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов врез на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 85-90. – EDN VKAWWJ.
8. Grishko, A. K. Intelligent technologies for restoring parameters of complex systems at the life cycle stages / A. K. Grishko // Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality. – 2024. – Vol. 1. – P. 172-175. – EDN HMDLMZ.
9. Линейные характеристики переменных подстроечных резисторов / Д. А. Кузин, Е. А. Вершинин, Н. К. Юрков [и др.] // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения - 2024») : Материалы XVI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых, Пенза, 06-07 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2024. – С. 204-206. – EDN UIQBBG.
10. Grishko, A. K. Control algorithm for decision making in multi-criteria optimization problems / A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2388, No. 1. – P. 012035. – DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012035. – EDN FZEIYN.
11. Гришко, А. К. Построение эффективной системы радиоэлектронных средств на основе анализа полумарковской модели обеспечения электромагнитной совместимости / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 4. – С. 18-25. – EDN YUDMYS.
12. Нечеткая модель принятия проектных решений на основе интервального анализа разнородной информации / А. К. Гришко, А. В. Моисеев, Е. И. Гришко, Ю. Е. Герасимова // Инжиниринг и технологии. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 52-55. – DOI 10.21685/2587-7704-2021-6-2-11. – EDN PDLXRK.
13. Mathematical Models of the System of Measurement and Analysis of Temperature Parameters of Radio Electronic Modules / A. K. Grishko, N. V. Goryachev, I. I. Kochegarov, M. P. Kalaev // 13th international scientifictechnical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE - 2016) : Proceedings: in 12 volumes, Novosibirsk, 03-06 октября 2016 года. Vol. Volume 1, Part 2. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – P. 112-115. – DOI 10.1109/APEIE.2016.7806424. – EDN WZWLZT.
14. Гришко, А. К. Математическое моделирование системы обеспечения тепловых режимов конструктивно-функциональных модулей радиоэлектронных комплексов / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2015. – № 3. – С. 27-31. – EDN VBIQZD.
15. Анализ и обеспечение эффективности технологического процесса / А. К. Гришко, А. Д. Цуприк, К. С. Новиков [и др.] // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2019. – Т. 1. – С. 272-274. – EDN DSGTPN.
16. Емельянов, А. С. Автоматизированное рабочее место контроля параметров переменных резисторов / А. С. Емельянов, Р. Р. Козин, П. Г. Андреев // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2016. – Т. 1. – С. 316-317. – EDN WHDORV.

УДК 621.3.095

**Кочеткова<sup>1</sup> К.Д., Гришко<sup>2</sup> А.К., Морозов<sup>3</sup> И.А., Янгазова<sup>4</sup> Э.Р.**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> kochetkova504@mail.ru

<sup>2</sup> alexey-grishko@rambler.ru

<sup>3,4</sup> vanka.morozkin@mail.ru

## **ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ**

**Аннотация.** Переменные резисторы являются одним из самых распространенных элементов в современной радиоаппаратуре. Рассмотрены основные проблемы контроля параметров современных резисторов, также называемых пассивным элементом электроцепей.

**Ключевые слова:** переменные резисторы, контроль параметров, точность, надежность, эксплуатационные характеристики, технические параметры

**Kochetkova<sup>1</sup> K.D., Grishko<sup>2</sup> A.K., Morozov<sup>3</sup> I.A., Yangazova<sup>4</sup> E.R.**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> kochetkova504@mail.ru

<sup>2</sup> alexey-grishko@rambler.ru

<sup>3,4</sup> vanka.morozkin@mail.ru

## **DIAGNOSTICS AND CONTROL OF VARIABLE RESISTOR PARAMETERS**

**Abstract.** Variable resistors are one of the most common elements in modern radio equipment. In this article, we will discuss the main problems of controlling the parameters of modern resistors, also known as passive elements of electrical circuits.

**Keywords:** variable resistors, parameter control, accuracy, reliability, performance characteristics, technical parameters

В современном мире различные предприятия часто сталкиваются с проблемами контроля параметров переменных резисторов, которые связаны с техническими, метрологическими и человеческими факторами. Впервые в мире электроники нормы контроля для параметров переменных резисторов начинали свое формирование еще в 1980 годах. Основным документом, регулирующим нормы контроля, является ГОСТ 24237-84. В данном ГОСТе описывается область применения переменных резисторов, их основные параметры, а также их размеры, в ГОСТе есть подробное описание технических требований. Отдельно в нем выделены и порядок контроля и подтверждения соответствия требованиям резисторов, методы испытаний, а именно, проверки заявленных характеристик и указания по эксплуатации [1-4].

В следствии роста потребности в стабильных и качественных параметрах пассивных компонентов, которые неотъемлемо присутствуют в различных аспектах повседневной жизни человека. Основные производственные компании, будь то государственные или частные структуры, продолжают производство пассивных электронных элементов, улучшая их технические параметры и метрические свойства. Это открывает новые горизонты для увеличения точности и устойчивости устройств, включающих такие компоненты, обеспечивая при этом стабильную востребованность на рынке, что полностью соответствует принципам современной экономической среды.

Улучшение характеристик резисторов неизбежно связано с необходимостью проведения целых комплексов трудоемких измерений различных технических параметров. В ходе проведения измерений предприятия стараются использовать только те пассивные элементы и только те приборы, которые способны обеспечить повышенную точность и исключительное повышение эксплуатационных характеристик, которые смогут возрастать при предъявлении к ним повышенных требований [5-8].

Предприятия и фирмы изготовителей стараются достичь высокой точности и максимальной продолжительности безотказной работы устройства. В погоне за этим в пассивных элементах электроцепи постоянно совершенствуется и меняется выбор конструкции, условия эксплуатации, техническое обслуживание, а также редактируется контроль качества и испытания, в связи с чем выпускаются новые ГОСТы и стандарты изделия.

В целях достижения прецизионной точности и исключительной производительности, предприятия, при проведении измерений, уделяют особое внимание выбору пассивных элементов и приборов. Именно поэтому такие гиганты индустрии, как фирма «Vishay», инвестируют до миллиона долларов ежегодно в модернизацию своего парка измерительного оборудования. Эта тенденция, хоть и в меньших масштабах, находит отражение и среди отечественных производителей.

У данного подхода существуют и свои слабые стороны: они проявляются в сложностях синхронизации работы устройств, негибкости ручного управления и, как следствие, в невозможности автоматизировать измерительный процесс. Принимая во внимание указанные выше ограничения, в некоторых ситуациях более целесообразным решением является применение специализированных систем, разработанные под

конкретную измерительную задачу, такие системы представляют собой органичное слияние программного обеспечения и аппаратных средств – единый измерительный комплекс [9-12]. В стремлении к налаживанию собственного производства, предприятия, специализирующиеся на выпуске резисторов, активно занимаются созданием высокоточных контрольно-измерительных систем. Эти системы находят широкое применение на всех этапах производственного цикла, начиная от научных исследований и заканчивая этапами выходного контроля [13-16].

Внедрение автоматизированных и цифровых систем контроля, а также развитие новых материалов и конструкций переменных резисторов открывают перспективы для повышения стабильности их параметров. Однако для достижения больших результатов требуется использовать комплексный подход, включающий как совершенствование самих изделий, так и методик их диагностики и калибровки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Intellectual Method for Reliability Assessment of Radio-Electronic Means / N. K. Yurkov, A. K. Grishko, A. V. Lysenko [et al.] // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018, Saratov, 27-28 сентября 2018 года. – Saratov: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 105-112. – DOI 10.1109/APEDE.2018.8542360. – EDN WUCKOJ.
2. Management of the design parameters in optimal design problems / S. V. Klyuev, A. V. Klyuev, A. K. Grishko, S. V. Trukhanov // Materials Science Forum. – 2019. – P. 723-728. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.723. – EDN HOLPXG.
3. Problems of Equipment Control in Automatic Information-measuring Control Systems / N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko, I. M. Rybakov // IEEE Proceedings of 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 08-10 ноября 2023 года. – Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2023. – P. 535-541. – DOI 10.1109/SUMMA60232.2023.10349550. – EDN RWKIIV.
4. Качурина, К. С. Риски процесса контроля параметров переменного резистора / К. С. Качурина // Инжиниринг и технологии. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 60-62. – DOI 10.21685/2587-7704-2022-7-1-13. – EDN SAIZNM.
5. Гришко, А. К. Анизотропная модель системы измерения и анализа температурных полей радиоэлектронных модулей / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1(15). – С. 82-88. – EDN VWODKJ.
6. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems / A. Grishko, A. Lysenko, N. Yurkov [et al.] // Proceedings - 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019, Yekaterinburg, 25-26 апреля 2019 года. – Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 432-435. – DOI 10.1109/USBREIT.2019.8736570. – EDN MUDDKI.
7. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов в цепи на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 85-90. – EDN VKAWWJ.
8. Grishko, A. K. Intelligent technologies for restoring parameters of complex systems at the life cycle stages / A. K. Grishko // Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality. – 2024. – Vol. 1. – P. 172-175. – EDN HMDLMZ.
9. Линейные характеристики переменных подстроечных резисторов / Д. А. Кузин, Е. А. Вершинин, Н. К. Юрков [и др.] // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения - 2024») : Материалы XVI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых, Пенза, 06-07 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2024. – С. 204-206. – EDN UIQBBG.
10. Grishko, A. K. Control algorithm for decision making in multi-criteria optimization problems / A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2388, No. 1. – P. 012035. – DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012035. – EDN FZEIYN.
11. Гришко, А. К. Построение эффективной системы радиоэлектронных средств на основе анализа полумарковской модели обеспечения электромагнитной совместимости / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 4. – С. 18-25. – EDN YUDMYS.
12. Нечеткая модель принятия проектных решений на основе интервального анализа разнородной информации / А. К. Гришко, А. В. Моисеев, Е. И. Гришко, Ю. Е. Герасимова // Инжиниринг и технологии. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 52-55. – DOI 10.21685/2587-7704-2021-6-2-11. – EDN PDLXRK.
13. Mathematical Models of the System of Measurement and Analysis of Temperature Parameters of Radio Electronic Modules / A. K. Grishko, N. V. Goryachev, I. I. Kochegarov, M. P. Kalaev // 13th international scientific conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE - 2016) : Proceedings: in 12 volumes, Novosibirsk, 03-06 октября 2016 года. Vol. Volume 1, Part 2. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – P. 112-115. – DOI 10.1109/APEIE.2016.7806424. – EDN WZWLZT.
14. Гришко, А. К. Математическое моделирование системы обеспечения тепловых режимов конструктивно-функциональных модулей радиоэлектронных комплексов / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2015. – № 3. – С. 27-31. – EDN VBIQZD.
15. Анализ и обеспечение эффективности технологического процесса / А. К. Гришко, А. Д. Цуприк, К. С. Новиков [и др.] // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2019. – Т. 1. – С. 272-274. – EDN DSGTPN.
16. Емельянов, А. С. Автоматизированное рабочее место контроля параметров переменных резисторов / А. С. Емельянов, Р. Р. Козин, П. Г. Андреев // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2016. – Т. 1. – С. 316-317. – EDN WHDORV.

УДК 618.1

Мамонтов<sup>1</sup> В.С., Юдин<sup>2</sup> И.Д., Мишин<sup>3</sup> А.В., Дарьин<sup>4</sup> В.Д., Семёнов<sup>5</sup> Н.Е.

1,2,3,4,5 Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

1,2,3,4,5 kpra@pnzgu.ru

## К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ДОСТУПА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗОЙ

**Аннотация.** В целях определения путей предотвращения нарушения технологических циклов разработки, производства и ремонта электронных блоков в условиях ограниченного доступа к электронной компонентной базе собраны и проанализированы наиболее критически важные узлы печатной платы блока. Вычлененным элементам отдельных узлов найдены аналоги, обладающие повышенной стойкостью и, как правило, более низкой стоимостью. Внесение изменений в схемотехнику плат в виде замены элементов на более доступные аналоги способствует повышению их надежности и ремонтопригодности. Были проведены испытания на блоках без внесенных в них изменений и с ними с последующим анализом их результатов.

**Ключевые слова:** надежность, электронная компонентная база, подбор аналогов, схемотехника, повышение стойкости

Mamontov<sup>1</sup> V.S., Yudin<sup>2</sup> I.D., Mishin<sup>3</sup> A.V., Darin<sup>4</sup> V.D., Semyonov<sup>5</sup> N.E.

1,2,3,4,5 Penza State University, Penza, Russia

1,2,3,4,5 kpra@pnzgu.ru

## TO THE ISSUE OF ENSURING TECHNICAL INDEPENDENCE IN CONDITIONS OF LIMITED ACCESS ENSURING THE ELECTRONIC COMPONENT BASE

**Abstract.** In order to determine ways to prevent disruption of the technological cycles of development, production, and repair of electronic units in conditions of limited access to electronic component base, the most critical units of the block printed circuit board are collected and analyzed. Analogues with increased durability and, as a rule, lower cost are found for the isolated elements of individual units. Making changes to the circuitry of the boards, in the form of replacing elements with more affordable analogues, will contribute to increasing their reliability and maintainability. Tests were conducted on blocks with and without modifications, followed by analysis of the results.

**Keywords:** reliability, electronic components, analog selection, circuit design, increased durability

### 1. Введение

В условиях ограниченного доступа к критически важной электронной компонентой базой (далее по тексту - ЭКБ) острой проблемой при производстве и эксплуатации электронных блоков является не только обеспечение организации производства с целью выполнения поставленных задач, но и обеспечение возможности гарантийного ремонта поступивших на ремонт блоков. Для достижения решения данных проблем необходимо на этапе проектирования, проводить анализ ЭКБ доступной к приобретению. Таким образом, указанная проблема будет рассмотрена на примере блока управления коммутацией электрооборудования электронном (далее по тексту - ЭБУ-КЭ), входящий в состав системы электрообеспечения автомобиля «КАМАЗ».

ЭБУ-КЭ должен обеспечивать выполнение следующих функций:

- Опрос состояния дискретных датчиков.
- Опрос состояния аналоговых датчиков.
- Управление исполнительными механизмами и элементами светотехники.
- Диагностирование неисправностей в цепях нагрузок.

Блок должен беспрепятственно выполнять свои функции в различных климатических условиях, а также обладать стойкостью к различным внешним воздействиям, таким как вибрации, влажность и температура.

### 2. Анализ отказов блока ЭБУ-КЭ

В процессе производства и реальной эксплуатации ЭБУ-КЭ неоднократно проводились как производственные испытания блока, так и была собрана статистика отказов блоков, проходивших гарантийный ремонт на предприятии-изготовителе. Были выделены следующие наиболее уязвимые компоненты отказ которых приводил к выводу из строя блоков:

Список уязвимых компонентов

Таблица 1

| Компонент               | Изготовитель              | Количество отказов за 5 лет |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| SG-8002CA4.000000MHzPHM | Epson, Япония             | 15                          |
| XC167CI16F40FBBFXQMA1   | Infineon, Германия        | 11                          |
| 24LC64-I/SN             | Microchip Technology, США | 8                           |

Основываясь на данной статистике, можно составить план повышения надежности, и как следствие ремонтопригодности, заключающийся в замене данных элементов на более стойкие и более доступные аналоги.

### 3. Возможные аналоги



Первым узлом является программируемый кварцевый генератор **SG-8002CA 4.0000000MHz PHM**. В качестве наиболее перспективного аналога выступает малогабаритный тактовый кварцевый генератор ГК241-П производства ООО «Пьезотрон», г.Москва.

Характеристики генераторов

Таблица 2

| Наименование | <b>SG-8002CA</b>        | ГК241-П                 |
|--------------|-------------------------|-------------------------|
| Частота      | 4,000000 МГц            | 4,000000 МГц            |
| Корпус       | <b>SMD 7,0 × 5,0 мм</b> | <b>SMD 7,0 × 5,0 мм</b> |
| Питание      | 5,0 В                   | 5,0 В                   |
| Тип выхода   | <b>CMOS</b>             | <b>CMOS</b>             |
| Точность     | <b>±100 ppm</b>         | <b>10...50 ppm</b>      |

Данный генератор полностью перекрывает требования по частоте, форме сигнала (**CMOS**) и напряжению питания 5 В. Дополнительно он обладает существенно меньшим уровнем фазовых шумов и джиттера по сравнению с программируемой серией **SG-8002**.

Следующим узлом, требующим внимательного подхода, является 16-разрядный микроконтроллер **XC167CI16F40FBBFXQMA1**. Для замены, данного элемента предлагается использовать радиационно-стойкий микроконтроллер 1887BE9T производства АО «НИИЭТ», г. Воронеж.

Характеристики микроконтроллеров

Таблица 3

| Наименование     | <b>XC167CI</b>     | 1887BE9T           |
|------------------|--------------------|--------------------|
| Архитектура      | <b>C166 / C167</b> | <b>C166 / C167</b> |
| Тактовая частота | 40 МГц             | 40 МГц             |
| Память ПЗУ       | 128 Кбайт          | <b>256 Кбайт</b>   |
| Память ОЗУ       | 8 Кбайт            | <b>15 Кбайт</b>    |
| Тип корпуса      | <b>TQFP-144</b>    | <b>4247.144-1</b>  |

Стоит обратить внимание на то, что данный чип поставляется в пластиковом корпусе **TQFP-144** для поверхностного монтажа. А 1887BE6T/9T в свою очередь выпускается в металлокерамическом корпусе 4247.144-1 с планарными выводами. Геометрия посадочного места на печатной плате потребует корректировки.

С точки зрения повышения ремонтпригодности переработка печатной платы с последующей установкой ГК241-П в долгосрочной перспективе, в условиях ограниченного доступа к ЭКБ, принесет очевидную выгоду.

Следующим важным элементом в нашем списке является микросхемы последовательной энергонезависимой памяти **24LC64-I/SN**. Для её замены предлагается использовать радиационно-стойкую микросхему 1636PP2Y производства АО «НИИМЭ», г. Зеленоград.

Характеристики микросхем

Таблица 4

| Наименование       | <b>24LC64-I/SN</b> | 1636PP2Y      |
|--------------------|--------------------|---------------|
| Объем памяти       | 64 Кбит            | 64 Кбит       |
| Интерфейс          | <b>I2C</b>         | <b>I2C</b>    |
| Напряжение питания | 2,5...5,5 В        | 2,5...5,5 В   |
| Тактовая частота   | до 400 кГц         | до 400 кГц    |
| Тип корпуса        | <b>SOIC-8</b>      | <b>SOIC-8</b> |

Российский аналог использует точно такую же карту адресов и систему команд интерфейса **I2C**, как и оригинальный чип **24LC64**. Замена в схеме не потребует изменения управляющего программного кода в микроконтроллере.

Так же аналог может поставляться в металлокерамическом корпусе Н02.8-1С, однако это потребует минимальной корректировки топологии контактных площадок.

4. Заключение. В результате проведенного анализа отказов ЭБУ-КЭ была изучена статистика дефектов за 5-летний период эксплуатации, выявлены наиболее уязвимые узлы, в которых применена ЭКБ ограниченная к приобретению, а также предложены конкретные технические решения по их замещению. Для максимального повышения ремонтпригодности рекомендуется полностью отказаться от применения ЭКБ, изготавливаемой такими фирмами как «Epson», «Infineon» и «Microchip» в пользу предложенных аналогов изготовителями которых являются, ООО «Пьезотрон», АО «НИИЭТ» и АО «НИИМЭ». Внедрение данных технических решений и сопутствующая переработка топологии печатных плат под доступную ЭКБ позволят не только повысить общую надежность изделия применения, но и гарантируют независимость процесса ремонта и производства в долгосрочной перспективе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 27.003-2010 Надежность в технике. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 51901.12-2007 Менеджмент риска. Методы анализа надежности.

3. ГОСТ Р 56542-2015 Надежность в технике. Методы испытаний на надежность.
4. ГОСТ Р 57407-2017 Надежность в технике. Методы анализа отказов и их последствий.
5. Иванов, А.В. Основы проектирования и эксплуатации электронных систем управления. – М.: Техносфера, 2018.
6. Петров, С.К. Надежность электронных устройств: методы анализа и повышения. – СПб.: Лань, 2019.
7. Сидоров, В.А. Электронные компоненты и их применение в промышленности. – М.: Радио и связь, 2020.
8. Кузнецов, Д.И. Анализ отказов электронных устройств и методы их предотвращения. – М.: Энергия, 2017.
9. Михайлов, Е.Н. Отечественные компоненты в электронике: преимущества и перспективы. – М.: Инфра-Инженерия, 2021.
10. Гусев, В.Г. Электронные системы управления автомобилями: проектирование и эксплуатация. – М.: Транспорт, 2018.
11. Романов, А.А. Вибрационные воздействия на электронные компоненты и методы защиты. – М.: Машиностроение, 2019.
12. Смирнов, И.П. Тепловые режимы работы электронных устройств и методы охлаждения. – М.: Энергоатомиздат, 2020.
13. Федоров, П.А. Применение супрессоров для защиты электронных схем. – М.: Радио и связь, 2018.
14. Козлов, В.М. Отечественные аналоги зарубежных электронных компонентов: сравнительный анализ. – М.: Электроника, 2021.
15. Белов, А.Н. Методы повышения надежности электронных блоков в условиях эксплуатации. – М.: Техносфера, 2019.

# АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

|                          |                    |                           |                              |
|--------------------------|--------------------|---------------------------|------------------------------|
| <i>Helal S.</i>          | 269                | <i>Гусев Ю.А.</i>         | 243, 335                     |
| <i>Kuvshinova E.V.</i>   | 253, 269, 341      | <i>Данилова Е.А.</i>      | 225, 230                     |
| <i>Mikheev M.Yu.</i>     | 253, 341           | <i>Даргерхан А.Х.</i>     | 119                          |
| <i>Peper L.N.M.</i>      | 253, 269, 341      | <i>Дарьин В.Д.</i>        | 325, 452                     |
| <i>Zhashkov A.A.</i>     | 341                | <i>Девяткин Н.А.</i>      | 277                          |
| <i>Zhashkova T.V.</i>    | 253, 269           | <i>Денисов В.А.</i>       | 181                          |
| <i>Азьяев А.А.</i>       | 391                | <i>Дмитриев С.В.</i>      | 126                          |
| <i>Аитов А.Ш.</i>        | 225, 230           | <i>Долгова В.В.</i>       | 160                          |
| <i>Алексеев А.А.</i>     | 243, 335           | <i>Дума Э.Г.</i>          | 266                          |
| <i>Аленичева А.А.</i>    | 150                | <i>Евдокимов Ю.М.</i>     | 405                          |
| <i>Андреева И.П.</i>     | 394                | <i>Егоров Н.А.</i>        | 243, 335                     |
| <i>Андреева Т.В.</i>     | 394                | <i>Едиханов А.К.</i>      | 273                          |
| <i>Арзамасов Н.В.</i>    | 115                | <i>Еникеев А.Р.</i>       | 189                          |
| <i>Артемьев Б.В.</i>     | 285                | <i>Ергалиев Д.С.</i>      | 24                           |
| <i>Архипов Д.Д.</i>      | 122                | <i>Ерофеев М.В.</i>       | 398                          |
| <i>Ашанин В.Н.</i>       | 112                | <i>Ершов Д.В.</i>         | 126                          |
| <i>Бабушкина Е.В.</i>    | 6                  | <i>Ефремов В.Р.</i>       | 54                           |
| <i>Бадеев В.А.</i>       | 76, 81             | <i>Жалнин В.П.</i>        | 131, 141, 150, 169, 181, 292 |
| <i>Бадеева Е.А.</i>      | 76, 81             | <i>Жандилдинова К.М.</i>  | 24                           |
| <i>Базарова М.Д.</i>     | 169                | <i>Жезло Д.И.</i>         | 131                          |
| <i>Баннов В.Я.</i>       | 353                | <i>Желнаков К.А.</i>      | 11, 14                       |
| <i>Баранов В.А.</i>      | 279                | <i>Зайцев Е.И.</i>        | 189, 447                     |
| <i>Бгури Нариман</i>     | 328                | <i>Зайцев С.А.</i>        | 93                           |
| <i>Белоусов И.В.</i>     | 282                | <i>Заров Е.В.</i>         | 372                          |
| <i>Боков А.А.</i>        | 225, 230           | <i>Засимов Д.С.</i>       | 391                          |
| <i>Болвашенков И.В.</i>  | 338                | <i>Затравкина Е.И.</i>    | 376                          |
| <i>Боровик С.Ю.</i>      | 59                 | <i>Зинкин С.В.</i>        | 307, 313                     |
| <i>Бростилов С.А.</i>    | 31, 100, 103, 247  | <i>Золотова М.А.</i>      | 150                          |
| <i>Бростилова Т.Ю.</i>   | 103, 108, 333      | <i>Иващенко А.В.</i>      | 338, 372                     |
| <i>Бушмелева К.И.</i>    | 348                | <i>Ильин К.А.</i>         | 279                          |
| <i>Вихорева А.С.</i>     | 108                | <i>Исаева Т.А.</i>        | 364                          |
| <i>Влазнева Е.В.</i>     | 160                | <i>Казанков А.А.</i>      | 318                          |
| <i>Власов А.И.</i>       | 141                | <i>Казарин И.Н.</i>       | 358                          |
| <i>Волков А.В.</i>       | 217, 221           | <i>Казыбаев А.М.</i>      | 119                          |
| <i>Волков С.В.</i>       | 34                 | <i>Калинин Д.М.</i>       | 103                          |
| <i>Воробьев С.Б.</i>     | 37                 | <i>Калинин Е.А.</i>       | 208                          |
| <i>Вторых Н.Р.</i>       | 259                | <i>Калинин К.Д.</i>       | 141                          |
| <i>Вьюгина С.В.</i>      | 345                | <i>Калюттик А.А.</i>      | 54                           |
| <i>Гайворонский А.И.</i> | 141                | <i>Карамергерров Т.Т.</i> | 356                          |
| <i>Гладун В.В.</i>       | 405                | <i>Карпов Д.В.</i>        | 119                          |
| <i>Глухов С.А.</i>       | 285                | <i>Кирюнин А.Е.</i>       | 3                            |
| <i>Годунов А.И.</i>      | 398                | <i>Кирюшина В.В.</i>      | 43, 37                       |
| <i>Голобоков С.В.</i>    | 115, 249, 328      | <i>Китаев А.С.</i>        | 279                          |
| <i>Головнин О.К.</i>     | 372                | <i>Китаев В.Н.</i>        | 3, 6                         |
| <i>Гордеева О.А.</i>     | 417                | <i>Ключников А.В.</i>     | 89                           |
| <i>Гордон А.А.</i>       | 325                | <i>Коваленко П.В.</i>     | 37, 43                       |
| <i>Городецкий Н.А.</i>   | 131                | <i>Колбанев М.О.</i>      | 367, 426                     |
| <i>Горячев Н.В.</i>      | 67, 394            | <i>Колесников И.Б.</i>    | 398                          |
| <i>Грачев А.Н.</i>       | 122                | <i>Коптева Т.В.</i>       | 108, 333                     |
| <i>Григорян Е.С.</i>     | 412                | <i>Кочегаров А.И.</i>     | 386                          |
| <i>Гришин Г.К.</i>       | 160                | <i>Кочегаров И.И.</i>     | 67, 239                      |
| <i>Гришко А.К.</i>       | 189, 394, 447, 450 | <i>Кочеткова К.Д.</i>     | 447, 450                     |
| <i>Грузд И.И.</i>        | 353                | <i>Крыгин М.С.</i>        | 169                          |
| <i>Гумаров И.Х.</i>      | 31                 |                           |                              |

|                  |                    |                |               |
|------------------|--------------------|----------------|---------------|
| Кудрина М.А.     | 417                | Самосейко В.Ф. | 282           |
| Кузичкин О.Р.    | 160, 169           | Сатторов Т.И.  | 356           |
| Кузнецов А.С.    | 333                | Саушев А.В.    | 122, 282      |
| Кузьмин Н.П.     | 318                | Сафонов Д.И.   | 3             |
| Куразов А.А.     | 225                | Секисов Ю.Н.   | 59            |
| Лазуткин Д.А.    | 76, 81             | Семенов А.Д.   | 126, 217, 221 |
| Ларионов Ю.Д.    | 292                | Семёнов Н.Е.   | 452           |
| Ларкин С.Е.      | 34, 100, 112       | Сергеев В.А.   | 93, 318       |
| Леонов А.С.      | 67                 | Сергин С.Ф.    | 3             |
| Литвинов В.В.    | 379                | Сорокин И.В.   | 282           |
| Максимов А.А.    | 239                | Тасимов В.Е.   | 307           |
| Маликова А.Қ.    | 24                 | Терехин Д.Н.   | 408           |
| Мамонтов В.С.    | 325, 452           | Терехин М.А.   | 338, 372      |
| Мараев А.В.      | 31                 | Титов Е.В.     | 6             |
| Медведева С.Н.   | 273, 277           | Тихомиров Т.А. | 328           |
| Мельников Д.А.   | 338                | Трусов А.В.    | 239, 408      |
| Михайлов П.Г.    | 47                 | Трусов В.А.    | 11, 14        |
| Михайлов С.А.    | 391                | Ушнурцев М.В.  | 285           |
| Мишин А.В.       | 325, 452           | Фадеев А.В.    | 100           |
| Моисеев А.С.     | 31                 | Фадейкина Т.Н. | 217, 221      |
| Монахов И.А.     | 202                | Филиппов Е.А.  | 202           |
| Морозов В.В.     | 195                | Фролов И.В.    | 93, 318       |
| Морозов И.А.     | 189, 450           | Целикин К.Д.   | 18            |
| Мурашкина Т.И.   | 76, 81             | Цыбарев Д.В.   | 115, 249      |
| Мухамбетов А.М.  | 398                | Чапаев В.С.    | 34, 100       |
| Наффати Баха     | 328                | Чеплакова Е.Ю. | 417           |
| Недорезов С.К.   | 292                | Шамин А.А.     | 367, 426      |
| Павлов И.А.      | 54                 | Шахнов В.А.    | 181           |
| Панкин А.М.      | 54                 | Шахнов В.В.    | 131           |
| Пасхин И.Н.      | 47                 | Шичкин Н.С.    | 122           |
| Перетягин А.В.   | 103, 247           | Шмелев К.В.    | 189           |
| Пестряева С.Ю.   | 430, 435, 440, 444 | Юдин И.Д.      | 325, 452      |
| Прохоров В.Ю.    | 358, 405           | Юдин М.А.      | 234           |
| Радаев О.А.      | 93, 318            | Юрков Н.К.     | 195, 356      |
| Рогов Д.А.       | 43                 | Ямпурин М.А.   | 85            |
| Романенко Ю.А.   | 364                | Ямпурин Н.П.   | 85, 376       |
| Рудин А.Р.       | 115                | Янгазова Э.Р.  | 447, 450      |
| Савицкий В.Я.    | 412                | Яременко Д.А.  | 348           |
| Саидмуродов М.Ш. | 34                 |                |               |

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ</b>                                                                                                                                    | <b>3</b>  |
| <i>Китаев В.Н., Кирюнин А.Е., Сафонов Д.И., Сергин С.Ф.</i><br><b>КЛАПАН - ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ КАНАЛОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ</b>                                                                                              | <b>3</b>  |
| <i>Китаев В.Н., Титов Е.В., Бабушкина Е.В.</i><br><b>МЕМБРАННЫЙ ДАТЧИК ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ</b>                                                                                                                     | <b>6</b>  |
| <i>Гордейчук К.А., Перебатов В.Н.</i><br><b>СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКСЕЛЕРОМЕТРА НА УСТАНОВКЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ</b>                                                                            | <b>9</b>  |
| <i>Желнаков К.А., Трусов В.А.</i><br><b>СОЕДИНЕНИЯ И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ В КОРПУСАХ СМАРТФОНОВ: КЛЕЕВЫЕ УЗЛЫ, УПЛОТНЕНИЯ И ТЕРМОМЕХАНИКА (ОБЗОР)</b>                                                                       | <b>11</b> |
| <i>Желнаков К.А., Трусов В.А.</i><br><b>МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СМАРТФОНОВ: ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ, АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, УПРОЧНЕННЫЕ СТЕКЛА И ЭМС-ЗАЩИТА (ОБЗОР)</b>                                 | <b>14</b> |
| <i>Целикин К.Д.</i><br><b>ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ НА ОСНОВЕ ВСТРОЕННОГО ЦИФРОВОГО КОНТУРА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ</b>                                  | <b>18</b> |
| <i>Маликова А.К., Ергалиев Д.С., Жандилдинова К.М.</i><br><b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА AIRBUS A320</b> | <b>24</b> |
| <i>Бростилов С.А., Гумаров И., Мараев А.В., Моисеев А.С.</i><br><b>РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА</b>                                                 | <b>31</b> |
| <i>Волков С.В., Ларкин С.Е., Чапаев В.С., Саидмуродов М.Ш.</i><br><b>УСТРОЙСТВО КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИЗНОСА АМОРТИЗАТОРА АВТОМОБИЛЯ</b>                                                                                 | <b>34</b> |
| <i>Коваленко П.В., Кирюшина В.В., Воробьев С.В.</i><br><b>РАСЧЁТ НАПРЯЖЁННОГО ОБЪЁМА ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b>                                                                   | <b>37</b> |
| <i>Кирюшина В.В., Коваленко П.В., Рогов Д.А.</i><br><b>ОПЫТ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b>                                                                 | <b>43</b> |
| <i>Михайлов П.Г., Пасхин И.Н.</i><br><b>ТЕХНОЛОГИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЭЛЕКТРОАДГЕЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ СО СТЕКЛОМ</b>                                                   | <b>47</b> |
| <i>Калюттик А.А., Панкин А.М., Ефремов В.Р., Павлов И.А.</i><br><b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНУТРИЗОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА</b>                                       | <b>54</b> |
| <i>Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н.</i><br><b>ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ</b>         | <b>59</b> |
| <i>Леонов А.С., Горячев Н.В., Кочегаров И.И.</i><br><b>ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ</b>                                                    | <b>67</b> |
| <i>Мурашкина Т.И., Бадеев В.А., Бадеева Е.А., Лазуткин Д.А.</i><br><b>МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ</b>                                                            | <b>76</b> |
| <i>Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Лазуткин Д.А., Бадеев В.А.</i><br><b>АНАЛИЗ МЕТОДОВ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ</b>                                                     | <b>81</b> |
| <i>Ямпурин М.А., Ямпурин Н.П.</i><br><b>УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ</b>                                                                                                                | <b>85</b> |

|                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ключников А.В.<br>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭТАЛОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МАССО-ИНЕРЦИОННОЙ АСИММЕТРИИ<br>ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ БАЛАНСИРОВОЧНОГО СТЕНДА                                                              | 89  |
| Зайцев С.А., Фролов И.В., Сергеев В.А., Радаев О.А.<br>ОТБРАКОВКА СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ ПО ОТНОШЕНИЮ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЙ<br>ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ                            | 93  |
| Бростилов С.А., Ларкин С.Е., Чапаев В.С., Фадеев А.В.<br>СИСТЕМА СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ АВТОМОБИЛЯ                                                                                                             | 100 |
| Калинин Д.М., Бростилова Т.Ю., Бростилов С.А., Перетягин А.В.<br>ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ<br>В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ 10 кВ                                                | 103 |
| Коптева Т.В., Бростилова Т.Ю., Вихорева А.С.<br>ПЕРЕХОД ОТ ШЕСТИПУЛЬСОВОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ НА ДВЕНАДЦАТИПУЛЬСОВУЮ СХЕМУ<br>В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКА                                              | 108 |
| Ашанин В.Н., Ларкин С.Е.<br>АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНОЕ УСТРОЙСТВО ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ<br>ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ ОТ ПОМЕХ ОБЩЕГО ВИДА                                                      | 112 |
| Голобоков С.В., Рудин А.Р., Цыбарев Д.В., Арзамасов Н.В.<br>ИНТЕГРАЦИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ВОДЫ В СЕТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ<br>ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ИНСОЛЯЦИИ                                                             | 115 |
| Карпов Д.В., Казыбаев А.М., Даргерхан А.<br>ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ СВЯЗИ MESHTASTIC<br>ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ОПОВЕЩЕНИЯ ГРАЖДАН                                                                                 | 119 |
| Грачев А.Н., Саушев А.В., Шичкин Н.С., Архипов Д.Д.<br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАРТОНОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ<br>С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОТНА И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА | 122 |
| Ершов Д.В., Дмитриев С.В., Семенов А.Д.<br>РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДА SHAPE-FROM-SHADING НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ГРАДИЕНТА ИЗОБРАЖЕНИЯ<br>ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОРФОЛОГИИ УЧАСТКА ПОВЕРХНОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ                       | 126 |
| Городецкий Н.А., Жалнин В.П., Жезло Д.И., Шахнов В.В.<br>ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ<br>МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР                                                 | 131 |
| Власов А.И., Гайворонский А.И., Жалнин В.П., Калинин К.Д.<br>ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ:<br>ОТ ГРАФЕНА ДО ПЕРОВСКИТОВ                                                      | 141 |
| Жалнин В.П., Аленичева А.А., Золотова М.А.<br>ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ:<br>ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ                                                                   | 150 |
| Влазнева Е.В., Гришин Г.К., Долгова В.В., Кузичкин О.Р.<br>МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ «МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК»<br>ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНЫХ ДАТЧИКОВ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ                               | 160 |
| Базарова М.Д., Жалнин В.П., Крыгин М.С., Кузичкин О.Р.<br>ОБЗОР СТРУКТУР ДАТЧИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ                                                                                                          | 169 |
| Жалнин В.П., Денисов В.А., Шахнов В.А.<br>АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ ДАТЧИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ                                                                                                     | 181 |
| Гришко А.К., Морозов И.А., Еникеев А.Р., Зайцев Е.И., Шмелев К.В.<br>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕРНИЗАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ                                                                         | 189 |
| Медведев С.С., Кочеткова К.Д., Кравчук А.Д., Фролов Н.Ю., Темиргали А.<br>ТЕНДЕНЦИИ МИНИАТЮРИЗАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ                                                            | 193 |
| Юрков Н.К., Морозов В.В.<br>ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ<br>СПОСОБОМ НАНЕСЕНИЯ ВЛАГОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ                                                                 | 195 |
| Филиппов Е.А., Монахов И.А.<br>ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ<br>В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ T-FLEX CAD ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ                                          | 202 |

|                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Калинин Е.А.</b><br>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ, ИЗГОТАВЛИВАЕМОЙ<br>И ИСПЫТЫВАЕМОЙ В РАМКАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ                                                                 | 208 |
| <b>Волков А.В., Семенов А.Д., Фадейкина Т.Н.</b><br>ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ<br>ДЛЯ НАТРИЕВЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ                                                                       | 217 |
| <b>Волков А.В., Семенов А.Д., Фадейкина Т.Н.</b><br>РЕЗЕРВУАРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ КАК МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ<br>НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ                                                                                      | 221 |
| <b>Боков А.А., Аитов А.Ш., Куразов А.А., Данилова Е.А.</b><br>ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ВЫСОКО-<br>СКОРОСТНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ | 225 |
| <b>Боков А.А., Аитов А.Ш., Данилова Е.А.</b><br>СРАВНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ТОРЦОВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ<br>И ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ НА КАЧЕСТВО ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ                                                   | 230 |
| <b>ГЛАВА 7. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ, ИЗМЕРЕНИЙ<br/>И СЕРТИФИКАЦИИ</b>                                                                                                                                         | 234 |
| <b>Юдин М.А.</b><br>АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ<br>ВЕКТОРА ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ                                                                                                                     | 234 |
| <b>Максимов А.А., Кочегаров И.И., Трусов А.В.</b><br>ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ<br>С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ AR-ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ QR-КОДА                                                    | 239 |
| <b>Егоров Н.А., Гусев Ю.А., Алексеев А.А.</b><br>ОСОБЕННОСТИ И СРЕДСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ<br>В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ                                                                                   | 243 |
| <b>Перетягин А.В., Бростилов С.А.</b><br>МОДЕРНИЗАЦИЯ РП-2 «КАРАКОЗОВА» С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ                                                                                                                       | 247 |
| <b>Цыбарев Д.В., Голобоков С.В.</b><br>ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ<br>С ВОЗМОЖНОСТЬЮ АККУМУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ                                                                                            | 249 |
| <b>Zhashkova T.V., Mikheev M.Yu., Pepel L.N.M., Kuvshinova E.V.</b><br>ASSESSING THE RELIABILITY OF NAVIGATION SOLUTIONS UNDER REFERENCE-OBJECT,<br>RECOGNITION ANOMALIES USING A SMALL-SCALE NEURAL NETWORK                  | 253 |
| <b>Вторых Н.Р.</b><br>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕНДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ<br>ВИНТОМОТОРНЫХ ГРУПП БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ                                                                                              | 259 |
| <b>Дума Э.Г.</b><br>ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЦВЕТОВЫХ ОТТЕНКОВ НА ТЕРМОГРАММАХ<br>В ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ                                                                                                                      | 266 |
| <b>Zhashkova T.V., Pepel L.N.M., Helal S., Kuvshinova E.V.</b><br>DIGITAL TWINS IN NAVIGATION TASKS OF AUTONOMOUS OBJECTS                                                                                                     | 269 |
| <b>Едиханов А.К., Медведева С.Н.</b><br>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ОДНО- И ДВУХКОМПЛЕКТНОГО<br>УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 кВ                                                      | 273 |
| <b>Девяткин Н.А., Медведева С.Н.</b><br>СТРУКТУРА ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ЭНЕРГОРАЙОНА С РАЗВИТЫМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ<br>ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ПРОГРАММ<br>УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ      | 277 |
| <b>Китаев А.С., Ильин К.А., Баранов В.А.</b><br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА ИМИТАЦИИ СИНУСОИДАЛЬНОГО<br>ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНХРОННОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО<br>ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ   | 279 |

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Сорокин И.В., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф., Саушев А.В.</i><br>МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ В ГРЕБНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ<br>С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА                | 282 |
| <i>Артемьев Б.В., Глухов С.А., Ушнурцев М.В.</i><br>МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ                                                                                                     | 285 |
| <i>Жалнин В.П., Ларионов Ю.Д., Недорезов С.К.</i><br>ДАТЧИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ВЫЗОВЫ                                                                            | 292 |
| <i>Зинкин С.В., Тасимов В.Е.</i><br>АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ АНТЕНН ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ                                                                                                                  | 307 |
| <i>Зинкин С.В.</i><br>ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ                                                                                                                          | 313 |
| <i>Казанков А.А., Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А., Кузьмин Н.П.</i><br>ЦИФРОВЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ С ОПТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ<br>ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ | 318 |
| <i>Мамонтов В.С., Дарьин В.Д., Мишин А.В., Юдин И.Д., Гордон А.А.</i><br>ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ                                                           | 325 |
| <b>ГЛАВА 8. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ<br/>БИОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b>                                                                                                             | 328 |
| <i>Голобоков С.В., Бгури Нариман, Наффати Баха, Тихомиров Т.А.</i><br>РЕАЛИЗАЦИЯ ГИДРОПOTЕНЦИАЛА МЁРТВОГО МОРЯ                                                                                                  | 328 |
| <i>Бростилова Т.Ю., Кузнецов А.С., Коптева Т.В.</i><br>АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ<br>ДЛЯ УДАЛЕННЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ                                                   | 333 |
| <i>Алексеев А.А., Гусев Ю.А., Егоров Н.А.</i><br>ЯВЛЕНИЕ ОБРАТНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ КАК НЕГАТИВНЫЙ ФАКТОР<br>ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ<br>В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ  | 335 |
| <i>Болвашенков И.В., Мельников Д.А., Терехин М.А., Иващенко А.В.</i><br>СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ ПОСТАВОК                                                                             | 338 |
| <i>Zhashkov A.A., Mikheev M.Yu., Pepel L.N.M., Kuvshinova E.V.</i><br>INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS INTO CYBER-PHYSICAL SYSTEMS                                                                | 341 |
| <i>Вьюгина С.В.</i><br>СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ РЕЧЕВОЙ КУЛЬТУРЫ СТУДЕНТА                                                                                                                                  | 345 |
| <i>Бушмелева К.И., Яременко Д.А.</i><br>ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ЗДАНИЯХ                                                                                                                  | 348 |
| <i>Баннов В.Я., Грузд И.И.</i><br>ПРОБЛЕМЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ                                                                                                                                        | 353 |
| <i>Юрков Н.К., Сатторов Т.И., Карамергергов Т.Т.</i><br>ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР КАК ТРИГГЕР РАЗВИТИЯ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ                                                                                             | 356 |
| <i>Прохоров В.Ю., Казарин И.Н.</i><br>ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ И ОПТИМИЗАЦИЯ БЮДЖЕТА ВРЕМЕНИ<br>САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН                                                                | 358 |
| <i>Романенко Ю.А., Исаева Т.А.</i><br>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ КАДРОВ<br>В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ                                                                      | 364 |
| <i>Колбанев М.О., Шамин А.А.</i><br>СТРАТИФИЦИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ                                                                                                                           | 367 |
| <i>Заров Е.В., Терехин М.А., Иващенко А.В., Головнин О.К.</i><br>ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА<br>ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПАТОЛОГИЙ                                           | 372 |
| <i>Затравкина Е.И., Ямпурин Н.П.</i><br>ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ОЗОНАТОРОВ                                                                                                            | 376 |



|                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Литвинов В.В.</i><br>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ В ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ<br>ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ                                                                           | 379 |
| <i>Кочегаров А.И.</i><br>ИСТОРИЯ СОКРЫТИЯ ТЕКСТА В КАРТИНАХ И СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ                                                                                                                         | 386 |
| <i>Азьяев А.А., Засимов Д.С., Михайлов С.А.</i><br>ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ПЕРЕХОД<br>ОТ ЭКОНОМИИ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ                                                | 391 |
| <i>Андреева И.П., Андреева Т.В., Гришко А.К., Горячев Н.В.</i><br>РАЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА ОПЕРАТОРА<br>С УЧЁТОМ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ                                                | 394 |
| <i>Годунов А.И., Ерофеев М.В., Мухамбетов А.М., Колесников И.Б.</i><br>КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ СПЕЦИАЛИСТА ПО ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ<br>МАЛОГАБАРИТНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ                             | 398 |
| <i>Прохоров В.Ю., Евдокимов Ю.М., Гладун В.В.</i><br>ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В КОЛЛЕДЖЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ                                                                      | 405 |
| <i>Терехин Д.Н., Трусков А.В.</i><br>УМНЫЙ ДОМ В АКВАРИУМЕ: АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОНИТОРИНГ АКВАРИУМНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ                                                                                            | 408 |
| <i>Савицкий В.Я., Григорян Е.С.</i><br>ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ МОТИВАЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ КУРСАНТОВ<br>В ВОЕННОМ ВУЗЕ В УСЛОВИЯХ ГЕОПОЛИТИЧЕСКИХ ВЫЗОВОВ                                                        | 412 |
| <i>Чеплакова Е.Ю., Гордеева О.А., Кудрина М.А.</i><br>ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕКСИЧЕСКИХ ПОВТОРОВ,<br>ТАВТОЛОГИЙ И ПЛЕОНАЗМОВ В ТЕКСТЕ                                                         | 417 |
| <i>Колбанев М.О., Шамин А.А.</i><br>КИБЕРПРОСТРАНСТВО КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ                                                                                                  | 426 |
| <i>Пестряева С.Ю.</i><br>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХЕТИПИЧЕСКИХ МЕТАФОР<br>В ЭРИКСОНОВСКОМ ГИПНОЗЕ И ЮНГИАНСКОЙ АКТИВНОЙ ИМАГИНАЦИИ                                                                         | 430 |
| <i>Пестряева С.Ю.</i><br>КОЛЛЕКТИВНОЕ БЕССОЗНАТЕЛЬНОЕ КАК ИСТОЧНИК МЕТАФОР:<br>МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АРХЕТИПИЧЕСКИХ ИСТОРИЙ                                                                             | 435 |
| <i>Пестряева С.Ю.</i><br>АРХЕТИП ТЕНИ В ЭРИКСОНОВСКИХ МЕТАФОРАХ: ОТ ДЕМОНИЗАЦИИ К ИНТЕГРАЦИИ                                                                                                             | 440 |
| <i>Пестряева С.Ю.</i><br>АРХЕТИПЫ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МЕТАФОРЫ:<br>ЮНГИАНСКИЕ ОСНОВАНИЯ ЭРИКСОНОВСКОЙ ТЕХНИКИ КОСВЕННОГО ВНУШЕНИЯ                                                                          | 444 |
| <i>Кочеткова К.Д., Гришко А.К., Янгазова Э.Р., Зайцев Е.И.</i><br>КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ                                                                               | 447 |
| <i>Кочеткова К.Д., Гришко А.К., Морозов И.А., Янгазова Э.Р.</i><br>ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ                                                                      | 450 |
| <i>Мамонтов В.С., Юдин И.Д., Мишин А.В., Дарьин В.Д., Семёнов Н.Е.</i><br>К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ<br>В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ДОСТУПА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗОЙ | 452 |
| АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ                                                                                                                                                                                     | 455 |

Научное периодическое издание

**ТРУДЫ**  
**Международного симпозиума**  
**НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО**

*Том 2*

*Посвящается году единства народов России и 65-летию  
со дня первого полета Юрия Гагарина в космос*

Все материалы представлены в авторской редакции

Корректор *А. А. Есавкина*

*Компьютерные дизайн и верстка*  
*В. А. Трусова*

Подписано в печать 21.05.2026. Формат 60×84  $\frac{1}{8}$ .

Усл. печ. л. 51,38.

Заказ № 175,1. Тираж 500.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета.

440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

Издательство ПГУ

Тел.: (8412) 66-60-49; 66-67-77

e-mail: iic@pnzgu.ru