*На правах рукописи*

**УТКИН Кирилл Эдуардович**

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНО-ТОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

**Специальность 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)**

**Автореферат**
**диссертации на соискание ученой степени**
**кандидата технических наук**

**ПЕНЗА – 2022**

Работа выполнена на кафедре «Ракетно-космическое и авиационное приборостроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет».

**Научный руководитель –** доктор технических наук, профессор
**Цыпин Борис Вульфович**

**Официальные оппоненты**: **Слесарев Юрий Николаевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»,
профессор кафедры «Автоматизация и управление»;

**Боровик Сергей Юрьевич**,
доктор технических наук,
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук,
директор

**Ведущая организация –** ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета 24.2.357.01 в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета и на сайте университета: https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/utkin

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета **Светлов Анатолий Вильевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время одними из наиболее востребованных в ракетно-космической технике, авиа- и вертолетостроении являются системы измерения давления, основным компонентом которых выступают тензорезистивные датчики давления (ТДД), обеспечивающие требуемое качество функционирования и безопасность. Несмотря на значительные возможности ТДД, актуальна задача повышения стабильности их характеристик в условиях длительного хранения, эксплуатации и при температурных воздействиях.

Достигнутая к настоящему времени приведенная нестабильность начального выходного напряжения ТДД составляет не менее ±7 % в условиях хранения и ±15 % в условиях эксплуатации. Приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал ТДД в диапазоне температур составляет $\pm\ 2\cdot10^{-4}$ 1/°С. Потребители ТДД требуют значений указанных параметров, соответственно, не более ±3 %, не более ±7 % и $\pm\ 4\cdot10^{-5}$ 1/°С.

Основой ТДД является чувствительный элемент, представляющий собой гетерогенную структуру, состоящую из подложки, изолирующего слоя, тензорезистора и контактных площадок. Стабильность характеристик чувствительного элемента определяет стабильность датчика в целом.

На стабильность метрологических характеристик чувствительного элемента влияют процессы межслойной диффузии и деградации тонких пленок. Для улучшения стабильности в технологический процесс изготовления ТДД вводятся дополнительные операции температурной стабилизации (в вакууме и на воздухе), состоящие в управляемом энергетическом воздействии на формируемые тонкопленочные резистивные структуры.

Импульсно-токовая стабилизация резистивных пленок является одной из разновидностей термотоковой обработки. Основной задачей импульсно-токовой стабилизации является предотвращение окисления верхнего резистивного слоя в процессе хранения и эксплуатации, предотвращение взаимодиффузии на границах раздела слоев (резистивного и диэлектрического) и устранение межзерновой диффузии. Основными недостатками существующих способов стабилизации параметров резисторов являются длительность процесса стабилизации (режим стабилизации в вакууме – нагрев 0,5 ч, выдержка 1,5 ч, остывание 1 ч, два цикла, режим стабилизации на воздухе – нагрев 0,5, выдержка 2 ч, остывание 1 ч), а также остаточная нестабильность параметров резисторов, обусловленная незаконченностью структурообразования резистивной пленки из-за наличия в ней скрытых дефектов.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемами разработки систем управления процессом производства стабильных ТДД занимались ученые Е. П. Осадчий, П. А. Колосов, Е. А. Мокров, В. И. Ваганов, А. И. Тихонов, В. А. Тихоненков, Ю. А. Зеленцов, Д. В. Лебедев, В. А. Семе-

нов, Р. М. Печерская, В. А. Васильев, И. В. Волохов, Е. Е. Eller, H. Jaffe, R. G. Jackson, J. Fraden, A. D. Kurtz и др.

Существующие системы управления процессом производства не способны реализовать адаптивные алгоритмы стабилизации параметров с учетом индивидуальных особенностей конкретного типа обрабатываемого резистора, так как не используют измерение параметров тензорезисторов в процессе стабилизации. В течение всего времени стабилизации режим воздействия на тензорезистор остается неизменным.

Совершенствование систем управления импульсно-токовой стабилизацией возможно на основе исследования энергораспределения воздействующих импульсов на тонкопленочные резисторы и нахождения закономерностей, направленных на выявление связи характеристик гетерогенной структуры ТДД с его метрологическими характеристиками.

Исследования показали, что для достижения необходимой стабильности процесс стабилизации должен изменяться/адаптироваться в соответствии с индивидуальными параметрами и характеристиками конкретного датчика.

Актуальной задачей является автоматизация сложного процесса импульсно-токовой стабилизации параметров тонкопленочных резисторов за счет разработки специализированной информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС), реализующей автоматизированный подбор параметров воздействующих импульсов для конкретного типа тензорезистивного датчика давления, с учетом характеристик тонкопленочных материалов (сплавов), применяемых при изготовлении тонкопленочного резистора.

**Цель диссертационного исследования** – разработка информационно-измерительной и управляющей системы стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления на основе адаптивных алгоритмов, позволяющей повысить стабильность метрологических характеристик датчиков и сократить время стабилизации.

Для достижения цели исследования поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Исследование способов и средств улучшения стабильности параметров тонкопленочных тензорезисторов, анализ эффективности импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления.

2. Совершенствование существующих систем управления процессом импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления.

3. Разработка алгоритма работы информационно-измерительной и управляющей системы, обеспечивающего стабилизацию чувствительных элементов тензорезистивных датчиков давления и предупреждающего их перегрев при одновременном уменьшении продолжительности процесса.

4. Разработка математического обеспечения функционирования информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления.

5. Проведение экспериментальных исследований нестабильности параметров тензорезистивных датчиков давления, изготовленных с применением разработанной информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись основные положения физики тонких пленок, теории конденсации тонких пленок и методы математического моделирования физических процессов в тонкопленочной гетероструктуре, методы системного анализа, математического анализа, теории погрешностей, теории измерений и теории электрических цепей. Основные теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями.

**Объект исследований**: информационно-измерительная и управляющая система импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления.

**Предмет исследований**: повышение эффективности информационно-измерительной и управляющей системы управления импульсно-токовой стабилизацией параметров тензорезистивных датчиков давления за счет реализации адаптивных алгоритмов стабилизации.

**Проблемы и задачи, решенные в диссертации**, соответствуют областям исследования специальности 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки): п. 2 – Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов структуры и образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений; п. 3 – Математическое, алгоритмическое, информационное, программное и аппаратное обеспечение информационно-измерительных и управляющих систем.

**Обоснованность и достоверность** научных положений и выводов подтверждается соответствием фундаментальным законам физики и химии, использованием современных аналитических и расчетных методов, метрологическими испытаниями тензорезистивных датчиков давления.

Основные теоретические выводы подтверждены результатами экспериментов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Усовершенствована структура и принцип построения информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления, позволяющей за счет введения элементов оперативного измерения сопротивления резисторов адаптивно производить импульсно-токовую обработку для достижения минимально возможной нестабильности параметров конкретного тензорезистивного датчика давления непосредственно в ходе технологического процесса (п. 2 паспорта специальности).

2. Разработаны алгоритм работы и программное обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы, в котором, в отличие от об-

щеизвестных способов, стабилизацию резисторов проводят в три этапа «пакетами» импульсов напряжения определенной амплитуды, длительности и скважности при непрерывном контроле сопротивления резисторов, что позволило обеспечить предупреждение перегрева резисторов, а также повысить временную и температурную стабильность параметров тензорезистивных датчиков давления при одновременном уменьшении продолжительности процесса стабилизации (п. 3 паспорта специальности).

3. Создано математическое обеспечение функционирования информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления, позволяющее рассчитать параметры импульсных последовательностей на всех этапах стабилизации тензорезисторов и реализующие индивидуальную программную корректировку процесса стабилизации для конкретного типа тензорезистивного датчика давления (п. 3 паспорта специальности).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Предложенные структура, алгоритм работы информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления и математическое обеспечение ее функционирования являются научной основой для повышения стабильности параметров тензорезистивных датчиков давления и позволяют систематизировать и формализовать взаимосвязи характеристик ТДД и воздействий, учесть переходные процессы, происходящие в гетероструктурах в процессе стабилизации. Полученные результаты апробированы в процессе импульсно-токовой стабилизации тензорезисторов, но могут быть также распространены на подобные задачи стабилизации параметров других гетерогенных структур.

Практическая значимость полученных результатов заключается:

1) в реализации информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизацией параметров тензорезистивных датчиков давления;

2) разработке программно-алгоритмического и математического обеспечения работы;

3) создании методики тестирования и отладки системы.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Научные и практические результаты диссертационной работы внедрены при выполнении гранта «Разработка автоматизированной системы импульсной стабилизации тонкопленочных резисторов» (инновационный проект по программе «У.М.Н.И.К.» ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», договор № 15547ГУ/2020 от 05.07.2020).

Научная и практическая значимость результатов исследований подтверждена актом об использовании результатов диссертационной работы в АО «НИИФИ» при изготовлении чувствительных элементов тонкопленочных тензорезистивных датчиков давления типа Вт 212 с целью проведения типовых испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 15.307 и подтверждения тактико-технических характеристик необходимым требованиям с последующим применением в серийном производстве тонкопленочных датчиков давления и справкой об использовании результатов диссертационной

работы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» при подготовке студентов по направлению 12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Информационно-измерительная техника и технологии»), в том числе при целевой подготовке студентов в интересах Роскосмоса.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты исследований по диссертационной работе апробированы на 8 международных конференциях и конкурсах: XI Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» («Шляндинские чтения – 2019»), XII Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» («Шляндинские чтения – 2020»), международном симпозиуме «Надежность и качество 2021», XXXIV Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах – 2021», Международной научно-практической конференции «Наука. Образование. Общество» (Тамбов, 2022), XXIV Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед – 2021», Всероссийском конкурсе научно-технических работ «Орбита молодежи» (2022), XIV Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» («Шляндинские чтения – 2022»).

**На защиту выносятся**:

1. Структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации тензорезистивных датчиков давления.
2. Алгоритм работы информационно-измерительной и управляющей системы, обеспечивающий трехэтапную послойную стабилизацию чувствительных элементов тензорезистивных датчиков давления и предупреждающий их перегрев.
3. Математическое обеспечение функционирования информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления.
4. Результаты экспериментальных исследований системы.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, соискателем сформулированы задачи, обоснованы методы их решения, выполнен анализ полученных результатов.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 научных работах, из них работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК) – 4, в изданиях, индексируемых в РИНЦ – 7, в том числе 3 единоличных работы без соавторов, 4 объекта интеллектуальной собственности.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 70 наименований, трех приложений. Объем работы: 157 страниц текста, включая 46 рисунков и 10 таблиц. Приложение к диссертации занимает 63 страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, раскрыты научная и практическая значимость, приведены данные об апробации, внедрении результатов работы, положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ процессов формирования тонкопленочных резисторов, видов тонких пленок, конструктивных и технологических методов улучшения стабильности тонкопленочного тензорезистивного датчика давления.

Для преобразования физических процессов статико-динамического давления в электрический сигнал наиболее часто используют тензорезистивный принцип измерения, заключающийся в изменении электрического сопротивления тензочувствительного материала в зависимости от физического воздействия.

Для всех типов пленок в различных конструкциях и при различных технологиях изготовления общими остаются следующие необходимые условия: способность к формированию требуемой топологии обычными методами фотолитографии, хорошая адгезия к подложке, минимальное количество посторонних включений.

Возможны различные сочетания видов тонких пленок при изготовлении ТДД. Во всех сочетаниях тонких пленок существует вероятность процессов деградации, диффузии материала, что, в свою очередь, влияет на стабильность электрических параметров тонкопленочных тензорезисторов.

Рассмотрены основные способы нанесения пленок на подложку тензорезистора:

– термическое испарение материалов в вакууме с процессом конденсации паров материалов на поверхность подложки;

– ионное распыление мишени с переносом атомов мишени на поверхность подложки;

– химическое осаждение пленок в процессе химических реакций в газовой фазе над поверхностью подложки с образованием пленкообразующего вещества с дальнейшим его осаждением на подложку.

Временная стабильность резистивных пленочных структур в условиях воздействия деградационных факторов определяется стабильностью внутренней структуры пленок, поскольку именно структура пленок (размер зерна, наличие дефектов) определяет скорость окисления, процессы электромиграции, диффузии и фазовых переходов. Кроме того, свойства тонких пленок определяются не только и не столько выбором исходных компонент, сколько параметрами технологического процесса изготовления: температурой осаждения, скоростью напыления, энергией конденсируемых частиц, состоянием подложки, давлением остаточных газов.

Причинами отказов тензорезисторов являются конструктивные, производственно-технологические и эксплуатационные факторы. В настоящее вре-

мя процессы деградации тонкопленочных структур, применяемых в ТДД, хорошо изучены. Наиболее интенсивно возникающие деградационные процессы в тонкопленочных структурах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Дефекты, влияющие на стабильность тонкопленочных тензорезисторов

| Дефект | Характеристика | Варианты предотвращения отказов тензорезистора |
|---|---|---|
| Выгорание тензорезистора | Электромиграция (электродиффузия) | 1. Разработка методов стабилизации для предотвращения выгорания тензорезистора.<br>2. Определение дефекта на ранней стадии изготовления |
| Коррозия тензорезистора | Электролитические воздействия, окисление пленок металлов и сплавов | 1. Разработка методов стабилизации для образования защитной оксидной пленки.<br>2. Определение дефекта на ранней стадии изготовления |
| Скрытый дефект | Взаимная диффузия материалов, твердофазные реакции, релаксация механических напряжений, реструктуризация (межзерновая диффузия) | 1. Разработка методов стабилизации для образования взаимно диффузионного слоя резистора и диэлектрика.<br>2. Определение дефекта на ранней стадии изготовления |

На основе анализа процессов деградации тонкопленочных гетерогенных структур и видов дефектов определены основные задачи, решение которых необходимо для достижения стабильности характеристик тонкопленочного тензорезистора при воздействии на него деградационных факторов, а также для достижения долговременной стабильности электрических параметров при хранении и функционировании ТДД.

**Во второй главе** рассмотрены преимущества импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезисторов и рассмотрены недостатки существующих способов стабилизации параметров тонкопленочных резисторов.

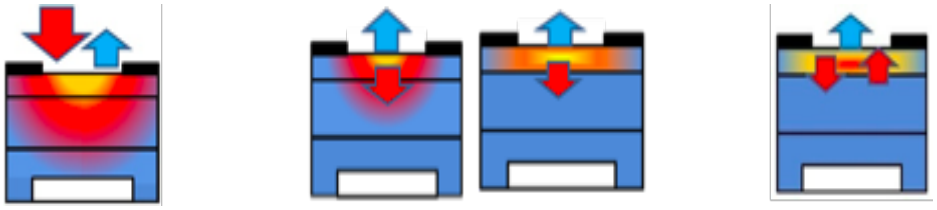
На сегодняшний день известны способы стабилизации тонкопленочных резисторов путем термообработки резисторов в термопечи, термической обработки диэлектрического основания с нанесенной резистивной пленкой и с помощью токовой тренировки импульсами.

Зоны распространения тепловой энергии при проведении стабилизации описанными способами представлены на рисунке 1.

Выявлены основные недостатки существующих способов:

– длительность процесса стабилизации (6,0–7,0 ч);

– низкая стабильность параметров резисторов, обусловленных незаконченностью структурообразования резистивной пленки по причине наличия в ней скрытых дефектов, связанных с состоянием поверхности подложки и процессом напыления.



*а*) *б*) *в*)

Рисунок 1 – Зоны распространения тепловой энергии при проведении стабилизации: *а* – термообработкой резисторов в термопечи; *б* – термической обработкой диэлектрического основания с нанесенной резистивной пленкой и токовой тренировкой импульсами; *в* – токовая тренировка импульсами

Показана целесообразность совершенствования системы управления импульсно-токовой обработкой. Предложена структура ИИУС (рисунок 2).

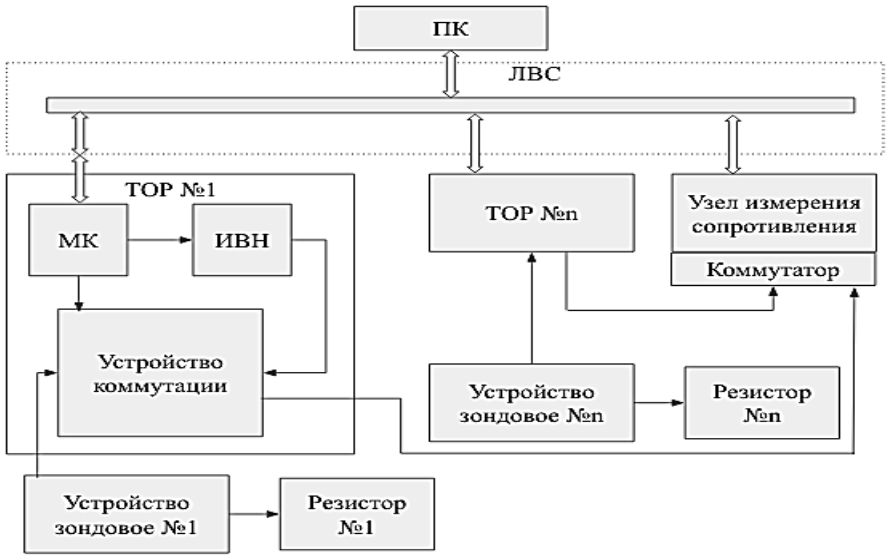



Рисунок 2 – Структурная схема ИИУС импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления

В систему входят персональный компьютер (ПК), служащий для автоматизации процесса управления режимами технологического процесса обработки и накопления статистической информации в процессе эксплуатации; устройство токовой обработки резисторов (ТОР); источник высоковольтного напряжения (ИВН); микроконтроллер (МК), управляющий ТОР в зависимости от режима работы; локальная вычислительная сеть (ЛВС); узел измерения сопротивления (УИС); зондовые устройства, обеспечивающие соединения с тонкопленочными резисторами, и устройства коммутации, которые позволяют увеличить количество подключаемых для стабилизации резисторов до двадцати. Особенностью ИИУС является то, что измерение сопротивления тензорезисторов происходит в паузах между «пакетами» импульсно-токовой обработки, и по результатам этих измерений изменяются параметры импульсов.

В диссертации рассмотрена схемотехническая реализация основных узлов ИИУС и приведены их принципиальные схемы.

**Третья глава** посвящена разработке программно-алгоритмического и математического обеспечения работы ИИУС стабилизации параметров тонкопленочных тензорезисторов.

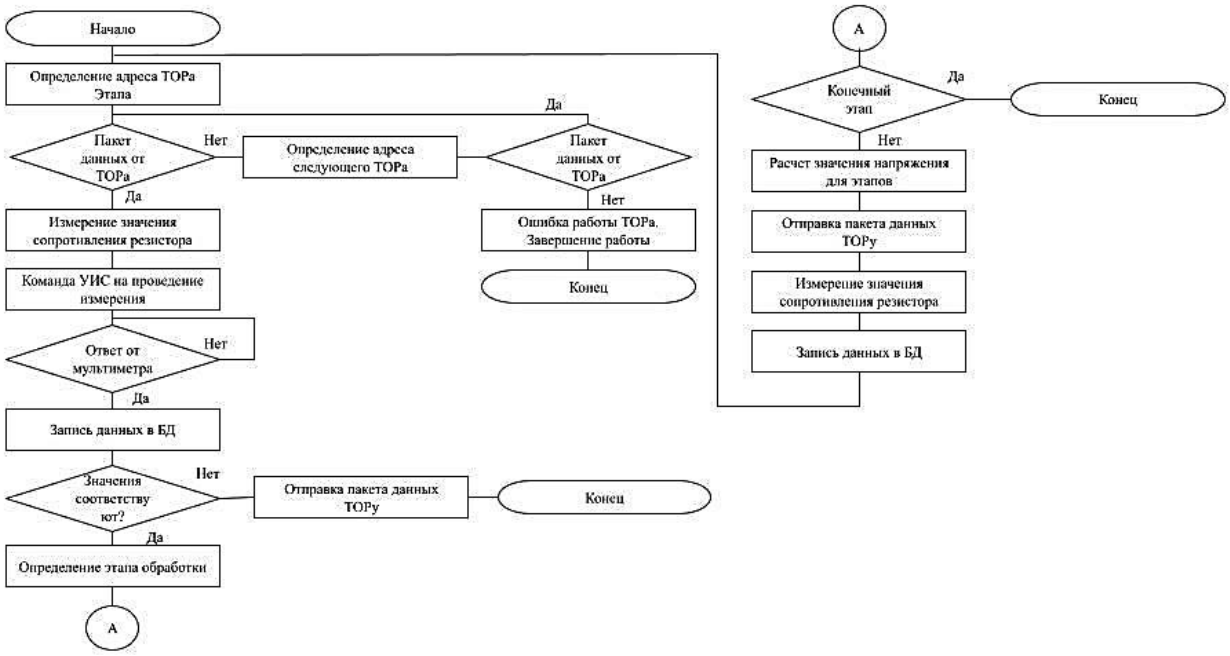
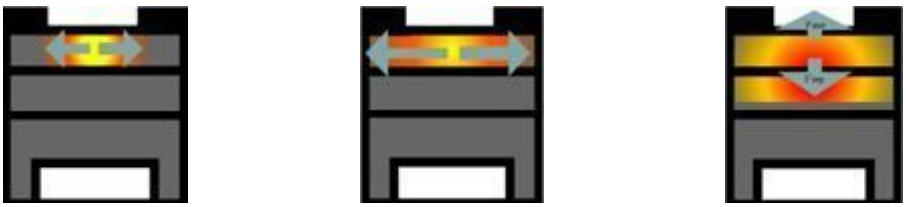



Рисунок 3 – Алгоритм работы ИИУС стабилизации параметров ТДД

Алгоритмом работы ИИУС (рисунок 3) предусмотрено три этапа обработки тензорезисторов (рисунок 4). На первом этапе параметры воздействующих электрических импульсов (амплитуда, скважность и длительность пачки импульсов) выбираются из условия предупреждения перегрева резисторов, на втором этапе – из условия достаточности температуры для структурирования тонкой резистивной пленки, на третьем этапе – из условия обеспечения ускоренной взаимодиффузии материалов и образования оксидного слоя.



Этап 1 Этап 2 Этап 3

Рисунок 4 – Зоны распространения тепловой энергии на этапах стабилизации

Программно-алгоритмическое обеспечение ИИУС на основе предложенного алгоритма позволяет производить обработку результатов измерений, поступающих с измерительного устройства, осуществлять управление модулем ТОР, вести базу данных обработанных чувствительных элементов, зада-

вать амплитуду, скважность и длительность пачки импульсов для каждого резистора и для каждого этапа. Возможность независимого программирования параметров воздействующих импульсов позволяет добиваться отсутствия излишнего термовоздействия на обрабатываемые структуры, подбора индивидуальных режимов для конкретно заданного типа и особенностей обрабатываемых тонкопленочных структур. Данная особенность разрабатываемой системы позволяет добиться высокой производительности и возможность автоматизации управления процесса импульсно-токовой стабилизации.

Сделан вывод о том, что основной комплексной задачей импульсно-токовой стабилизации является предотвращение окисления верхнего резистивного слоя в процессе хранения и эксплуатации, предотвращение взаимодиффузии на границах раздела слоев (резистивного и диэлектрического) и устранение межзерновой диффузии. Эти задачи могут быть решены за счет образования защитного оксидного слоя, препятствующего дальнейшему окислению резистивного слоя; образования слоя силицидов на границах раздела слоев, препятствующего взаимодиффузии резистивного слоя и слоя диэлектрика; сращивания кристаллитов в один монокристалл, что предотвращает межзерновую диффузию в процессе хранения и эксплуатации.

Математическое обеспечение предназначено для расчета параметров импульсного воздействия. Оно основано на анализе выражения энергетического баланса:

$$W = Q_{\text{рез}} + Q_{\text{пер}} + Q_{\text{изл}},$$

или

$$(U^2/R)\,\Delta t = Q_{\text{рез}} + \Delta P_{\text{пер}}\,\Delta t + \Delta P_{\text{изл}}\,\Delta t, \qquad (1)$$

где $W$ – энергия, выделяющаяся за время $t$ в объеме тонкопленочного резистора $W = IUt$, $I$ – сила тока; $U$ – напряжение, приложенное к резистору; $Q_{\text{рез}}$ – количество теплоты, необходимое для нагревания резистора массой $M$ от температуры $T_0$ до температуры $T_1$, $P_{\text{пер}}$ – мощность, передаваемая от резистора подложке (основанию, на котором он расположен); $P_{\text{изл}}$ – мощность, рассеиваемая поверхностью резистора в окружающую среду.

Длительность импульса и его амплитуду на первом и втором этапах стабилизации задают из условия обеспечения достаточной температуры для структурирования тонкой резистивной пленки, а на третьем этапе стабилизации – из условия обеспечения достаточной температуры для окисления верхнего слоя резистивной пленки и ускоренной взаимодиффузии резистивной пленки и пленки диэлектрика.

Из выражения (1) можно вывести соотношение между длительностью импульса и его амплитудой $U_{\text{имп}}$, обеспечивающими достаточную температуру для структурирования тонкой резистивной пленки. При этом длительность импульса напряжения и его амплитуда на первом и втором этапах связаны соотношениями:

$$t_{\text{имп }1} = k_{\text{рс}}\,(Q_{\text{рез}}\,/(U^2_{\text{изм}}\,/R_{\text{н}} - P_{\text{пер}} - P_{\text{изл}})), \qquad (2)$$

$$t_{имп\ 2} = Q_{рез} /(U^2_{изм} /R_н – P_{пер} – P_{изл}), \quad (3)$$

где $t_{имп\ 1}$, $t_{имп\ 2}$ – длительности импульса на этапах 1 и 2 соответственно; $k_{рс}$ – коэффициент резистивного слоя, определяемый в зависимости от свойств резистивного сплава, применяемого при изготовлении тонкопленочного резистора; $Q_{рез}$ – количество теплоты, полученное резистором за время прохождения импульса длительностью $t_{имп}$; $U_{имп}$ – амплитуда импульсов напряжения; $R_н$ – сопротивление резистора, измеренное непосредственно перед проведением стабилизации и в паузах между этапами.

На третьем этапе параметры импульсов связаны соотношением:

$$t_{имп\ 3} = Q_{рез} + Q_{диэл} / (U^2_{имп1} /R_н – (P^1_{пер} + P_{изл} + P^1_{изл})), \quad (4)$$

где $t_{имп\ 3}$ – длительность импульса при проведении третьего этапа обработки; $Q_{диэл}$ – количество теплоты, полученное диэлектриком от резистора за время прохождения импульса длительностью $t_{имп}$; $U_{имп1}$ – амплитуда импульсов напряжения при проведении третьего этапа обработки; $R_н$ – значение сопротивления резистора, полученное после проведения второго этапа обработки; $P^1_{изл}$ – мощность, рассеиваемая поверхностью диэлектрика в окружающую среду; $P^1_{пер}$ – мощность, передаваемая от диэлектрика нижерасположенному основанию.

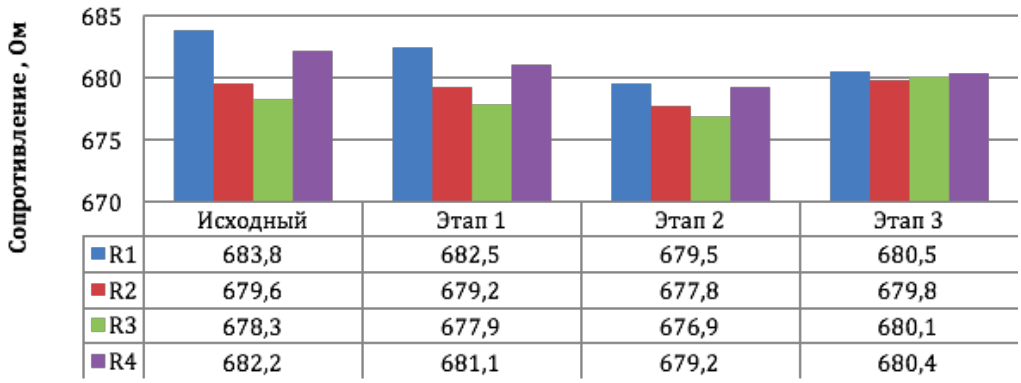
В качестве примера в таблице 2 приведены результаты расчета параметров воздействия для стабилизации сопротивления тонкопленочного тензорезистора с номинальным сопротивлением 683,8 Ом из сплава нихром Х20Н75Ю.

Таблица 2 – Параметры воздействия для стабилизации сопротивления тонкопленочного тензорезистора R1 с номинальным сопротивлением 683,8 Ом из сплава нихром Х20Н75Ю

| № | Параметры импульса | Этап 1 | Этап 2 | Этап 3 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Период следования импульсов | 1,14 мс | 1,16 мс | 1,04 с |
| 2 | Амплитуда импульсов, В | 145 | 184 | 100 |
| 3 | Длительность импульсов одного пакета | 12,34 мкс | 13,68 мкс | 10,04 мс |
| 4 | Количество импульсов в пакете | 8 | 8 | 8 |
| 5 | Продолжительность воздействия одного пакета | 9,12 мс | 9,28 мс | 8,32 с |

Результаты расчета использованы при экспериментальной проверке ИИУС. В процессе проверки были получены следующие значения сопротивления тензорезисторов по этапам стабилизации, представленные на рисунках 5 и 6.

Таким образом, установлено, что применение импульсно-токовой стабилизации позволяет проводить полное структурирование (укрупнение кристаллитов), выявлять и устранять скрытые дефекты резистивного слоя, что положительно влияет на надежность и стабильность параметров тензорезисторов в процессе эксплуатации и хранения.




| | Исходный | Этап 1 | Этап 2 | Этап 3 |
|---|---|---|---|---|
| R1 | 683,8 | 682,5 | 679,5 | 680,5 |
| R2 | 679,6 | 679,2 | 677,8 | 679,8 |
| R3 | 678,3 | 677,9 | 676,9 | 680,1 |
| R4 | 682,2 | 681,1 | 679,2 | 680,4 |

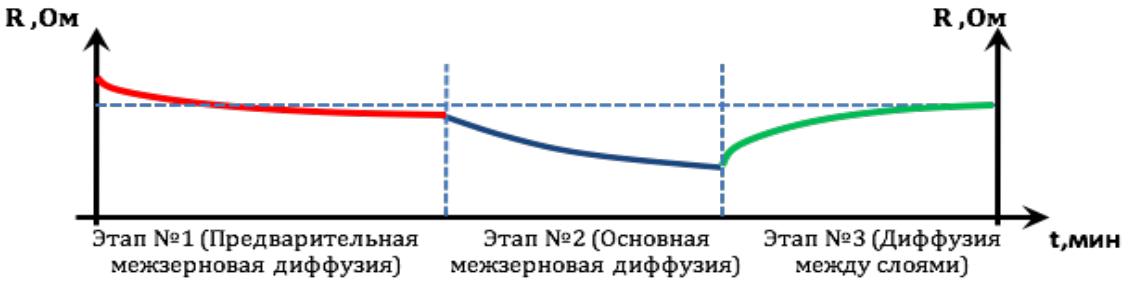



Рисунок 5 – Характер изменения значения сопротивления тонкопленочных резисторов импульсно-токовой стабилизации в три этапа

*а*) *б*) *в*)

Рисунок 6 – Этапы стабилизации: *а* – предварительная диффузия межзерновых границ, *б* – основная диффузия межзерновых границ, *в* – диффузия между слоями, образование оксидного слоя, салицидов

**Четвертая глава** посвящена практическому внедрению результатов исследования. Представлен действующий макет разработанной ИИУС (рисунок 7).

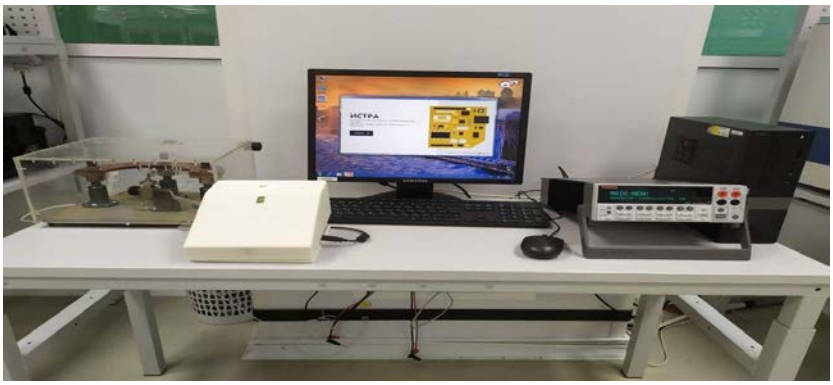


Рисунок 7 – ИИУС импульсно-токовой стабилизации параметров ТДД

Разработана методика стабилизации параметров ТДД, а также методики тестирования и отладки ИИУС. На базе АО «НИИФИ» изготовлен экспериментальный образец ИИУС импульсно-токовой стабилизации ТДД и проведена его отладка и тестирование.

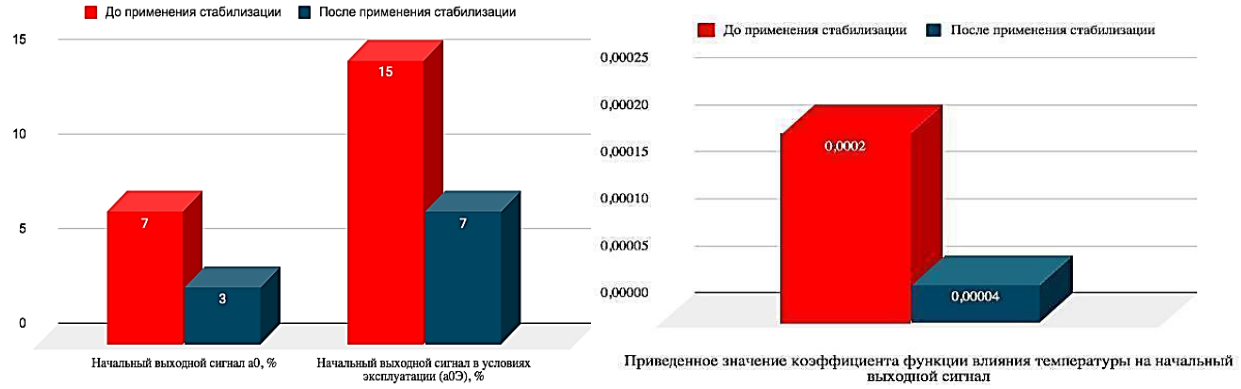



Рисунок 8 – Сравнительный анализ приведенной погрешности измерения начального выходного сигнала ТДД и приведенного значения коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал до и после применения стабилизации

Основные характеристики, полученные в результате тестирования:

– амплитуда импульсов напряжения в диапазоне 50–260 В;

– длительность высоковольтных импульсов в диапазоне 10 μс – 10 мс.

Сравнительный анализ метрологических характеристик ТДД до и после применения стабилизации показал уменьшение приведенной погрешности начального выходного сигнала при хранении – до 3 %, при эксплуатации до 7 %, приведенного значения коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал – $\pm\, 4 \cdot 10^{-5}$ 1/°С.

Экспериментальные проверки в объеме трех партий ТДД показали работоспособность аппаратной части и программной составляющей системы управления, что делает возможным использование разработанной системы управления в производственном процессе АО «НИИФИ».

**В приложении** приводятся акты внедрения результатов работы, листинги разработанных программ:

1. Программа управления устройством импульсно-токовой обработки тонкопленочных резисторов. Язык программирования – С (Си), объем программы – 13 448 байт, вид и версия ОС отсутствует.

2. Программа управления автоматизированной системой импульсно-токовой обработки тонкопленочных резисторов. Язык программирования – LabVIEW, объем программы – 987 648 байт.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе достигнута цель исследования, заключающаяся в разработке системы управления импульсно-токовой стабилизацией параметров тензорезистивных датчиков давления, позволяющей повысить стабильность метрологических характеристик датчиков и сократить время стабилизации.

Получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена перспективная структура информационно-измерительной и управляющей системы, позволяющая адаптивно производить импульсно-токовую обработку тензорезистивных датчиков давления для достижения минимально возможной нестабильности метрологических характеристик тензорезистивных датчиков давления.

2. Разработан алгоритм работы и программное обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы, обеспечивающий трехэтапную послойную стабилизацию чувствительных элементов тензорезистивных датчиков давления и предупреждающий их перегрев.

3. Разработано математическое обеспечение функционирования информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления, позволяющее рассчитать параметры импульсных последовательностей на всех этапах стабилизации тензорезисторов для конкретного типа тензорезистивного датчика давления.

4. Проведены экспериментальные исследования информационно-измерительной и управляющей системы при стабилизации параметров трех партий тензорезистивных датчиков давления (в общей сложности 30 датчиков). В результате стабилизации параметров датчиков уменьшена приведенная погрешность начального выходного сигнала при хранении – до 3 %, при эксплуатации – до 7 %, а приведенного коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал $\pm\ 4\cdot10^{-5}$ 1/°С. При этом продолжительность процесса стабилизации сокращена до 3 минут.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Уткин, К. Э. Управляемый синтез тонких пленок, полученных методом магнетронного распыления / К. Э. Уткин, С. И. Торгашин, А. В. Хошев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2. – С. 41–46.

2. Уткин, К. Э. Технологии создания микромеханических датчиков и тонкие пленки в их конструкциях / К. Э. Уткин, В. Е. Пауткин // Приборы. – 2020. – № 4 (238). – С. 9–13.

3. Уткин К. Э. Теоретические аспекты импульсно-токовой стабилизации сопротивления тонкопленочных резисторов первичных преобразователей /

К. Э. Уткин, П. А. Колосов, Б. В. Цыпин, И. В. Макаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4. – С. 58–64.

4. Уткин, К. Э. Информационно-измерительная и управляющая система импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления / К. Э. Уткин, Б. В. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 57–64.

**Публикации в других изданиях**

5. Уткин, К. Э. Способ импульсно-токовой диффузии тонкопленочных резисторов / К. Э. Уткин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2019») : материалы XI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 288–292.

6. Уткин, К. Э. Способы стабилизации тонкопленочных резисторов: недостатки и преимущества / К. Э. Уткин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2020») : материалы XI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – С. 338–342.

7. Уткин, К. Э. Особенности построения оборудования для выявления потенциально ненадежных тонкопленочных резисторов импульсно-токовым методом / К. Э. Уткин, С. И. Торгашин, Б. В. Цыпин, Е. М. Соловьева, Е. Э. Уткин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2021. – С. 118–122.

8. Уткин, К. Э. Влияние температуры подложки на значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и структуру резистивной пленки из сплава П65ХС / К. Э. Уткин, С. А. Здобнов, Б. В. Цыпин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сборник статей по материалам XXXIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. – С. 139–143.

9. Уткин, К. Э. Конструкционно-технологические особенности формирования тонкопленочных тензорезисторов влияющие на выходные параметры датчика давления // Вестник научных конференций. – 2022. – № 4-2 (80). – С. 127–131.

10. Уткин, К. Э. Коррекция характеристик чувствительных элементов датчиков давления / Б. В. Цыпин, С. А. Здобнов, К. Э. Уткин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 124–130.

11. Уткин, К. Э. Алгоритм работы информационно-измерительной и управляющей системы импульсно-токовой стабилизации параметров тензорезистивных датчиков давления / К. Э. Уткин, Б. В. Цыпин // Методы, сред-

ства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2022») : материалы XI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. – С. 159–163.

**Объекты интеллектуальной собственности**

12. Патент 27722213 Российская Федерация. Способ стабилизации резисторов / Уткин К. Э., Колосов П. А., Торгашин С. И., Степанов С. В. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ», г. Пенза. – № 2019127093 ; заявл. 27.08.2019 ; опубл. 28.05.2020, Бюл. № 16.
13. Программа управления устройством импульсно-токовой обработки тонкопленочных резисторов. (Программа для ЭВМ) / Уткин К. Э., Майоров А. В., Суханкин Д. Ю., Степанов С. В. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ», г. Пенза. – № 2020661118 ; заявл. 11.09.2020 ; опубл. св-во государственной регистрации от 18.09.2020.
14. Патент 2747115 Российская Федерация. Устройство стабилизации резисторов / Уткин К. Э., Колосов П. А., Торгашин С. И., Суханкин Д. Ю., Степанов С. В., Майоров А. В. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ», г. Пенза ; заявл. 09.06.2020 ; опубл. св-во государственной регистрации от 27.04.2021.
15. Программа управления автоматизированной системой импульсно-токовой обработки тонкопленочных резисторов. (Программа для ЭВМ) / Уткин К. Э., Перов А. В., Суханкин Д. Ю., Уткин Е. Э. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ», г. Пенза. – № 2021618214 ; опубл. св-во государственной регистрации от 25.05.2021.

*Научное издание*

**УТКИН Кирилл Эдуардович**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА
ИМПУЛЬСНО-ТОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.2.11 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (технические науки)

Распоряжение № 15-к/22 от 19.10.2022.

Редактор *В. В. Устинская*
Технический редактор *Ю. В. Анурова*
Компьютерная верстка *Ю. В. Ануровой*

Подписано в печать 21.10.2022.
Формат 60x84 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. л. 1,16.
Тираж 100. Заказ № 559.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел.: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru