

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ, ТЕХНИКЕ, ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (25)

2018

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Алферова Л. В., Королева Л. А., Нагорная О. С.

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ
И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ: МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ
И НАЦИОНАЛЬНАЯ СПЕЦИФИКА4

Власов А. В., Абреков М. М.

ПРО РОССИЙСКИХ КОМПАНИЙ: КЛАССИЧЕСКИЙ
И АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПУТИ ПРИВЛЕЧЕНИЯ ИНВЕСТИЦИЙ 18

Перепелкина Е. В.

СТРУКТУРНЫЕ СДВИГИ В ЭКОНОМИКАХ
СТРАН-ЭКСПОРТЕРОВ НЕФТИ И ГАЗА,
ИМЕЮЩИХ РАЗНУЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ
НАКОПЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА.....31

Скоробогатова Т. Н., Шейко А. В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ СЕРВИСНОЙ ЛОГИСТИКИ
ПРИ ОКАЗАНИИ УСЛУГ ИНДУСТРИИ КУЛЬТУРЫ45

Тусков А. А., Грошева Е. С., Палаткин И. В., Шорохова О. С. ИНДУСТРИЯ 4.0 В АПК: ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	55
--	----

Федоськина Л. А., Байгушкин А. А. РЕАЛИЗАЦИЯ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ СТАНДАРТА ISO/TS 29001-2010 В СБЫТОВОЙ СЕТИ НЕФТЯНОЙ КОМПАНИИ	65
---	----

РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, МЕХАНИЗМЫ В ТЕХНИКЕ

Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е., Печерская Е. А., Печерский А. В. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЛАСТИН ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	72
---	----

Балашова И. Ю., Прошкина Е. Н. АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССУЖДЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПОДБОРА ПЕРСОНАЛА	80
---	----

Вашуков Ю. А., Климов Е. А. АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	89
--	----

Волков А. К. СИСТЕМА СЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКОЙ И МОНИТОРИНГА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ДОСМОТРОВОЙ ТЕХНИКИ	105
--	-----

Игнатьев А. А., Добряков В. А., Игнатьев С. А., Шамсадова Я. Ш. ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СТАНКА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ШПИНДЕЛЬНОМ УЗЛЕ	122
--	-----

Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ABS-ПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ	130
---	-----

Мартышкин А. И. ВОЗМОЖНАЯ СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОБЩЕЙ ШИНЫ.....	141
---	-----

Мостовой В. Д., Бирюков В. П. КОМПЕНСАЦИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧИ НА ОСНОВЕ РЕДУЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ	151
Печерская Е. А., Головяшкин А. Н., Головяшкин А. А., Зинченко Т. О., Печерский А. В., Фимин А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	167
Подшивалова К. С., Подшивалов С. Ф. ДИХОТОМИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ГРАФА.....	178
Тырсин А. Н., Азарян А. А. МЕТОДЫ УСТОЙЧИВОГО ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СПУСКА ПО УЗЛОВЫМ ПРЯМЫМ	188
Федорина Е. В., Дьяков И. Ф. КЛАСТЕР НОМЕНКЛАТУРЫ ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСКРОЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА	203

РАЗДЕЛ 1

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

УДК 334.02

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ: МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ И НАЦИОНАЛЬНАЯ СПЕЦИФИКА

Л. В. Алферова, Л. А. Королева, О. С. Нагорная

STRATEGIC PLANNING AND QUALITY MANAGEMENT OF HIGHER EDUCATION: INTERNATIONAL STANDARDS AND NATIONAL SPECIFICITY

L. V. Alferova, L. A. Koroleva, O. S. Nagornaya

Аннотация. *Актуальность и цели.* В статье анализируются перспективы сопряжения стратегического планирования и управления качеством в организациях высшего образования в современных реалиях неустойчивой внешней среды, смены ориентиров международных стандартов качества на студенто-ориентированное образование, законодательного определения требований к долгосрочному планированию. Для любого вуза возникает настоятельная потребность выработки механизмов реагирования на постоянные изменения без потери уникальности созданной конкретной образовательной организацией среды, адаптации к внешним вызовам без утраты накопленных традиций. *Материалы и методы.* Анализ международных и российских нормативно-правовых актов, подходы и методы стратегического менеджмента, адаптированные к сфере образования, моделирование процессов оценки качества. *Результаты.* Современные концепции стратегического планирования и управления качеством, разработанные с учетом международных стандартов, позволяют определить комплекс средств и методов для адаптации образовательной организации к условиям неопределенности, высокой конкуренции и меняющихся нормативных рамок. Важным условием является привлечение к процессу планирования основных стейкхолдеров образовательного процесса, создание транспарентной системы отклика на сигналы участвующих сторон, что позволит своевременно корректировать отдельные элементы системы, не нарушая при этом уникальность созданной образовательной среды организации. Система стратегического планирования и управления качеством на современном этапе должна также учитывать требования интернационализации образования и науки, студент-ориентированные концепции управления, публичности разрабатываемых и реализуемых моделей. *Выводы.* При проектировании и модернизации системы стратегического планирования и управления качеством образования организации целесообразно включить в рабочие группы представителей студентов и работодателей, обеспечить систему обратной связи с потребителями, действенность механизмов реагирования на требования внешней среды и своевременную разработку корректирующих мероприятий, пересмотреть внедрить модель самодиагностики деятельности с учетом передовых моделей, к примеру, EFQM, сформировать квали-

метрическое обеспечение внутривузовской системы качества, а также обратить внимание на уровень квалификации экспертов по качеству в сфере проектирования, интернационального сотрудничества, руководства проектными группами.

Ключевые слова: стратегическое планирование, управление качеством, международные стандарты качества, высшее образование, модели качества.

Abstract. Background. The article analyzes the prospects for linking strategic planning and quality management in higher education institutions in the current realities – an unstable external environment, changing of international quality standards to student-centered education, and legislative definition of requirements for long-term planning. There is necessary to develop mechanisms for responding to permanent changes without losing the uniqueness of the environment created by the particular educational organization, adaptation to external challenges without losing the accumulated traditions. **Materials and methods.** Analysis of international and Russian regulations, approaches and methods of strategic management, adapted to the sphere of education, modeling of quality assessment processes. **Results.** Actual concepts of strategic planning and quality management, developed in accordance with international standards, allow us to define a set of tools and methods for adapting the educational organization to conditions of uncertainty, high competition and a changing regulatory framework. An important condition is to involve the educational process in the process of planning the main stakeholders, create a transparent system of response to the signals of the parties involved, which will allow correcting the individual elements of the system in a timely manner, without violating the uniqueness of the created educational environment of the organization. The system of strategic planning and quality management at the current stage should also take into account the requirements of the internationalization of education and science, student-oriented concepts of management, publicity of models being developed and implemented. **Conclusions.** When designing and modernizing the system of strategic planning and quality management of the organization, it is advisable to include representatives of students and employers in the working groups, to provide a feedback system to consumers, the effectiveness of mechanisms for responding to environmental demands and the timely development of corrective measures, to revise the self- models, for example, EFQM, to form a qualimetric support for an intra-university quality system, as well as pay attention to the level of qualifications of quality experts in the field of project culture, international cooperation, leadership of project groups.

Key words: strategic planning, quality management, international quality standards, higher education, quality models.

Реалиями последнего десятилетия в сфере высшего образования является подвижность правового пространства и перманентный характер его переопределения: публикуемые нормативные документы заново регламентируют входные и выходные требования к процессу обучения, унифицируют или диверсифицируют рамочные условия для его отдельных этапов. Основным трендом последних лет является попытка сопряжения образовательных и профессиональных стандартов, которая пока не привела к однозначным результатам. Хотя в целом подразумевается, что образовательная организация обладает самостоятельностью в определении некоторых элементов самого процесса обучения, любое предписание «сверху» выступает причиной трансформации всей системы или ее составляющих. Возникает настоятельная потребность выработки механизмов реагирования на подобные изменения без потери уникальности созданной конкретной образовательной организацией среды, адаптации к внешним вызовам без утраты традиций конкретного вуза. Подобную возможность предоставляют технологии стратегического планиро-

вания, заимствованные у бизнес-структур с учетом специфики образовательного процесса. Разработка стратегии не является сама по себе панацеей, она не подразумевает моментального решения обозначенных проблем, но позволяет вывести организацию из состояния хаотичного реагирования на ситуационные вызовы среды, придать ее деятельности смысл и долгосрочный характер.

Одной из базовых основ и одновременно целей стратегического планирования является управление качеством образования, параметры которого определяются не только нормотворчеством самой организации и контролирующими органами, но и являются интегративным условием глобального образовательного пространства. С одной стороны, данное пространство максимально дифференцировано: вузы отличаются друг от друга по своим миссиям, способам реализации образования, направлениям сотрудничества. С другой, возрастающая интернационализация обучения, внедрение индивидуальных траекторий, которые предполагают возможность прохождения курсов вне основного вуза и обязательность признания полученных зачетных единиц, выступают в настоящий момент в качестве генерализующих трендов и факторов неопределенности. Они обуславливают рост запросов к качеству и ресурсному потенциалу любой организации, необходимость выработки адаптивных стратегий в целях обеспечения соответствия международным стандартам и повышения конкурентоспособности.

На основе анализа международных документов и методических рекомендаций в сфере стратегического планирования и обеспечения качества, опыта образовательных организаций высшего образования в данной статье предполагается проанализировать актуальные тенденции развития в данной сфере, адаптировать существующие модели к практической деятельности с учетом российской специфики.

Стратегическое планирование развития образовательной организации: концептуальные и нормативные основы

Согласно классическим теориям менеджмента, стратегическое планирование представляет собой динамическую совокупность взаимосвязанных управленческих процессов, логически вытекающих один из другого и наличие обратной связи в виде этапа оценки и контроля предыдущих этапов в целях установления несоответствий. Согласно И. Ансоффу, успех организации «зависит от правильного применения определяемых обстоятельствами методов, которые учитывают изменения в настоящем и будущем разнообразии окружающей среды функционирования организации. Для того чтобы обеспечить достижение оптимальных результатов, организация должна использовать виды планирования и инструменты реализации планов в соответствии с тем, как меняется сложность окружающей среды» [4]. Стратегическое планирование способно придать организации динамичность, а также гибкость конфигурации в зависимости от условий, выявленных в среде ее функционирования.

Актуальность применения стратегического планирования в современной образовательной организации обосновывается в том числе возможностью адаптированного применения ФЗ № 172 от 28 июня 2014 г. «О стратегическом планировании в РФ» [13] к специфике образовательных организаций. Данный нормативный акт предлагает определенную иерархию стратегических документов, необходимую терминологию, предписывает системный

подход к разработке стратегических документов. При формировании системы стратегического планирования в образовательной организации целесообразно также использовать методические рекомендации по подготовке стратегий развития отраслей экономики Министерства экономического развития РФ [9]. Данный документ предлагает четкую структуру стратегического планирования, последовательность этапов, конкретные методики решения задач, этапы и сроки реализации стратегии, возможные целевые показатели, ориентировочные планы мероприятий по реализации стратегии.

Применение стратегического планирования позволяет образовательной организации:

- целенаправленно исследовать внешние и внутренние факторы, влияющие на ее функционирование и развитие;
- определять сценарии развития, вероятность возникновения рисков;
- обозначить приоритетные направления развития и следовать им;
- своевременно корректировать запланированные шаги;
- определять показатели деятельности для последующего контроля;
- рационально распределять ресурсы;
- осуществлять реализацию планов образовательной организации в целом и ее отдельных подразделений.

Стратегия развития образовательной организации должна обеспечивать управление ее развитием с учетом происходящих изменений и формировать условия для взаимодействия между руководителями и сотрудниками образовательной организации, абитуриентами, их родителями, обучающимися, представителями работодателей, государством, обществом и другими участниками образовательных и социальных процессов.

Рекомендуемый тайминг разработки системы стратегического планирования может быть заимствован из ФЗ № 172: стратегия пересматривается каждые 6 лет с перспективой на период в 12 лет и более. В процессе стратегического планирования важно оценивать возможности всех предполагаемых участников, анализировать существующие условия, вырабатывать оптимальные показатели эффективности программы, а также прогнозировать риски. Все это поможет выбрать оптимальные пути достижения целей. К разработке документов СП должны привлекаться основные стейкхолдеры образовательного процесса: помимо руководства вуза таковыми являются работодатели, общественные, научные и иные организации. В процессе стратегического планирования важно оценивать возможности всех предполагаемых участников, анализировать существующие условия, вырабатывать достижимые показатели эффективности программы, а также прогнозировать риски.

Управление качеством образования: студенто-ориентированность, публичность, совершенствование

Являясь участником Болонского процесса и будучи активно включенной в Европейское пространство высшего образования (далее – ЕПВО), Россия присоединилась к решениям конференции министров, прошедшей в Ереване в 2015 г. Одной из основных тем форума стало обсуждение сотрудничества стран в сфере трансграничного признания квалификаций и компетенций, а также основных результатов деятельности в области обеспечения качества. На встрече были одобрены Стандарты и рекомендации для

обеспечения качества в ЕПВО, в создании которых приняли участие ряд международных объединений, в частности, Европейская ассоциацией обеспечения качества высшего образования. Ее представителями в Российской Федерации являются Национальное аккредитационное агентство в сфере образования (г. Москва) и Национальный центр общественно-профессиональной аккредитации (г. Йошкар-Ола). Кроме того, в качестве разработчиков были привлечены Европейский союз студентов, Европейская ассоциация университетов, Европейская ассоциация учреждений высшего образования, Европейский регистр агентств обеспечения качества в высшем образовании. В целях «усиления ясности, применимости, полезности и практической значимости» при работе учитывалось мнение ключевых стейкхолдеров – потребителей услуг, министерств, работодателей [12].

Одно из важных положений Рекомендаций стала констатация нового вектора развития высшего образования – изменения парадигмы в сторону студенто-ориентированного образования и обучения. Как считают авторы документа, «в ответ на диверсификацию и возрастающие ожидания высшее образование должно осуществить значительный сдвиг в преподавании; в обучении назрела необходимость в подходе, ориентированном на студента, в поиске более гибких образовательных траекторий и признании компетенций, приобретенных за рамками формальных учебных программ» [12]. Студенто-ориентированное обучение играет важную роль в повышении мотивации, саморефлексии и вовлеченности обучающихся в учебный процесс. Отсюда требования к привлечению студентов и других стейкхолдеров к оценке и пересмотру программ, а также к процессу внутреннего нормотворчества: предусмотрено включение обучающихся в процедуры разработки ключевых документов организации, в том числе в процессы стратегического планирования и управления качеством.

Вовлеченность в процессы обеспечения качества внутренних систем и внешних институций позволяет европейским системам высшего образования продемонстрировать уровень конкурентоспособности и увеличить прозрачность системы, тем самым способствуя взаимному доверию, признанию квалификаций, программ и других видов образовательной деятельности. Как признают европейские стандарты, *качество*, хотя и трудно поддается определению, является, главным образом, результатом взаимодействия между преподавателями, обучающимися и образовательной средой вуза [12]. Процедура управления качеством видится циклом постоянного совершенствования и нацелена на обеспечение соответствующих целей развития образовательной среды, содержания программ, образовательных возможностей и средств.

Европейские стандарты и рекомендации основаны на следующих принципах управления качеством в ЕПВО:

- высшие учебные заведения несут основную ответственность за качество предоставляемого образования и его обеспечение;
- обеспечение качества отвечает потребностям (национальных) систем высшего образования, вузов и студентов;
- обеспечение качества принимает во внимание потребности и ожидания студентов, других стейкхолдеров и общества в целом [12].

Одним из требований к политике обеспечения качества образовательными организациями является ее публичный характер – отражение в различных медиумах концептуального и институционального видения, процессов стратегического менеджмента и их результатов. Соответствующие структуры

должны обеспечить привлечение внутренних и внешних стейкхолдеров к разработке и внедрению политики качества, эффективность которой повышается при наличии связей между научными исследованиями, преподаванием и обучением, учете (интер)национального контекста, в котором работает организация, а также уникальности собственной образовательной среды.

Определенные требования предъявляются и к специалистам, вовлеченным в процедуры управления качеством на вузовском, национальном и международном уровне. Предложенные Европейской ассоциацией качества рамки квалификаций [1], предполагают компетенции специалистов по качеству в разных областях: знания сферы образования на интернациональном уровне (включая исследовательский опыт и участие в международных проектах), опыт проектного менеджмента, технического решения проблем, письменной и устной коммуникации, руководства проектными командами.

***Стратегическое планирование развития организации:
моделирование, оценка, реализация***

При стратегическом планировании образовательной организации необходимо руководствоваться принципом интеграции, который предполагает объединение разрозненных элементов планирования в единую систему. На рис. 1 представлено комплексное видение системы планирования и управления развитием образовательной организации.

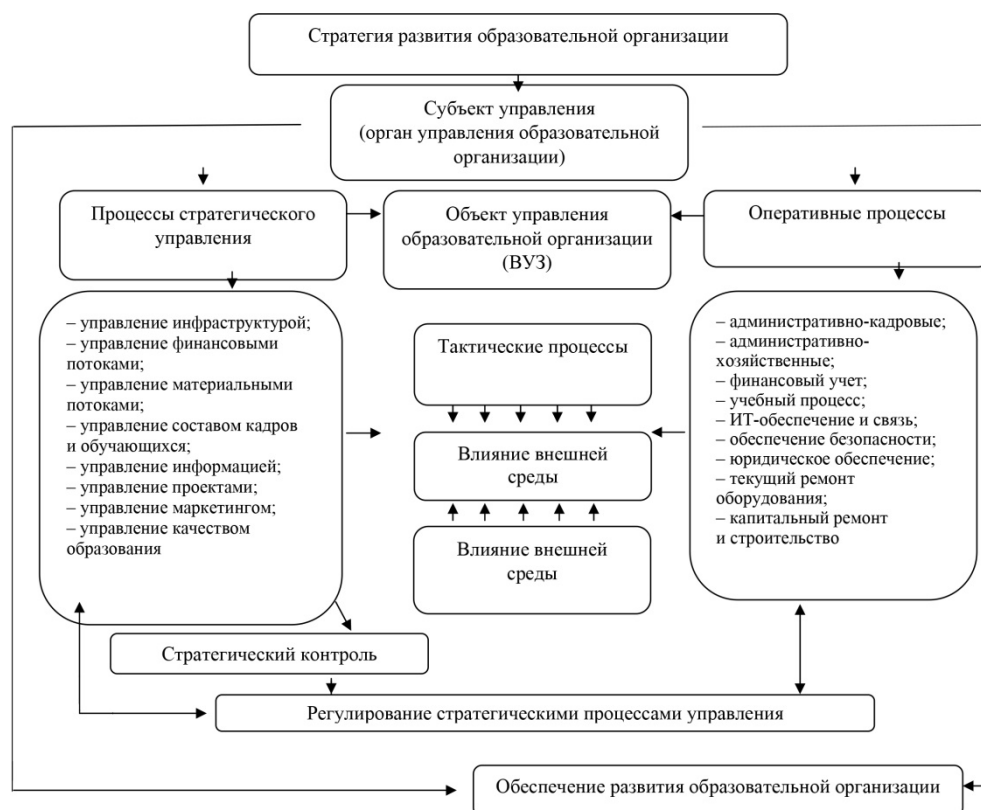


Рис. 1. Структура стратегического управления развитием образовательной организации

Существуют различные взгляды на систему стратегического планирования в высшей школе [5]. Обобщив ряд моделей, можно представить следующую визуализацию их совокупности (рис. 2).



Рис. 2. Модель стратегического планирования образовательной организации

Рассмотрим ключевые элементы данного процесса более подробно:

1. *Определение миссии и стратегических целей организации.* Миссия – это генеральная цель образовательной организации, демонстрирующая ее предназначение как конкурентоспособной структуры, представленная в наиболее общей форме и определяющая основную причину существования организации. Наиболее распространенным на сегодняшний день форматом стратегических целей выступает система сбалансированных стратегических показателей (*Balaced Scorecards*), которая переводит и конкретизирует целевые ориентиры и стратегию организации в комплекс интегрированных рабочих целевых значений (*targets* – количественное выражение уровня, которому должен соответствовать тот или иной показатель).

2. *Анализ и оценка внешней и внутренней среды.* Стратегический анализ предполагает исследование следующих ее компонентов: макросреды, непосредственного окружения, внутренней среды. Кроме того, целесообразно изучить нормативно-правовую базу, включающую нормативные документы федерального, регионального уровней, а также внутренних документов.

А) Анализ макросреды, как правило, проводится с применением метода PEST-анализа, который изучает влияние на организацию таких компонентов среды, как правовое регулирование и политические процессы; состояние экономики; социальная и культурная составляющие общества; научно-технологический уровень. В случае образовательной организации PEST-анализ применяется в виде количественной экспертной оценки (табл. 1).

Таблица 1

PEST – анализ факторов макросреды

Политика	Р	Экономика	Е
Вхождение в Европейское пространство высшего образования (Болонская система) Реформа образовательной системы, реализация компетентностного подхода в образовании Разработка и внедрение профессиональных стандартов Ужесточение показателей аккредитации Внедрение мониторинга эффективности организаций высшего образования Ужесточение требований к размещению информации об образовательной организации в сети Интернет		Уровень инфляции Цены на энергоресурсы Введение практики образовательных кредитов; Негибкость ценовой политики в государственных образовательных организациях и как следствие высокая плата за образовательные услуги	
Социум	S	Технология	Т
Демографические изменения (снижение доли населения в возрасте 15–19 лет) Изменения структуры доходов населения в условиях экономического кризиса Изменение уровня подготовки абитуриентов в связи с введением ЕГЭ Искусственное повышение престижности технического образования на фоне сохранения престижности высшего образования в целом Отсутствие корреляции между потребностью населения в получении высшего образования и потребностями рынка труда		Утверждение модели «экономики знаний» и «информационного общества» Повышение требований к деятельности образовательных организаций в сфере инноватики и НИОКР Информатизация образовательных технологий в рамках контактной работы преподавателя и обучающихся; Дистанционные технологии обучения	

В табл. 2 приведем шаблон количественной и качественной оценки факторов PEST-анализа.

Таблица 2

Количественная оценка факторов PEST-анализа

№	Факторы	Знак влияния +/-	Качественная оценка	Вес	Оценка	Взвешенная оценка	Σ
1	Социальные факторы Демографические изменения (снижение доли населения в возрасте 15–19 лет)	–	значит	0,1	4	–0,4	0,4
2	Изменения структуры доходов населения (снижение)	–	существ	0,03	3	–0,09	0,09
3	...						
N	Суммарная оценка			1			3,48

Суммарная оценка демонстрирует уровень реакции вуза на стратегические факторы внешней среды, который определяется в следующем диапазоне: высокий – 4, средний – ..., низкий – 1.

После этого высчитывается сумма положительных и отрицательных факторов и определяется коэффициент предпочтения внешней среды как отношение суммы положительных баллов к сумме отрицательных. В случае, если коэффициент предпочтения внешней среды больше единицы, вуз занимает благоприятное положение на рынке в макросреде.

Б) Непосредственное окружение анализируется по следующим основным компонентам: отрасль и рынок, где функционирует организация; конкуренты; потребитель; поставщик; рынок рабочей силы и др. Для осуществления оценки рынка труда в случае образовательной организации рекомендуется разработать алгоритм анкетирования работодателей и выпускников с целью выявления:

- готовности работодателей к сотрудничеству с образовательными учреждениями в области проведения дальнейших исследований рынка труда;
- потребности в кадрах;
- основных требований к выпускникам;
- основных ожиданий выпускников;
- уровня удовлетворенности выпускников.

В) Анализ внутренней среды образовательной организации, как и стратегический анализ внешней среды, должен быть системным и многофакторным. Он позволяет определить те внутренние возможности и потенциал, на которые организация может рассчитывать. К составляющим внутренней среды образовательной организации можно отнести: кадровый потенциал, научный потенциал, образовательный процесс, учебно-методическая работа, воспитательная работа, финансовые показатели, материально-техническая база, трудоустройство выпускников, их карьерный рост, маркетинг и реклама, организационная структура и др. Изучение этих факторов позволяет определить образовательной организации сильные и слабые ее стороны. В целях обобщения большого объема работы по диагностике позиции образовательного учреждения можно применить метод SWOT-анализа. Как отмечает Д. В. Валько, важно учитывать, что составляющие потенциала организации находятся в сложной взаимосвязи друг с другом, при которой приращение потенциала достигается лишь при сбалансированном увеличении составляющих [6].

3. На этапе *определения стратегических альтернатив и выбора стратегии* принимаются решения о будущей стратегии развития, ее концепции, учитывая реальные возможности развития образовательного учреждения. На основе общей стратегии развития (корпоративной стратегии) необходимо разрабатывать функциональные стратегии каждого направления деятельности (учебная, научная, воспитательная, инновационная деятельность, качество, маркетинг, финансы, кадры, IT и т.д.). Стратегическое планирование должно быть подкреплено ключевыми показателями деятельности – теми индикаторами реализации стратегии, которые организация определяет самостоятельно, но с учетом требований внешней среды:

- лицензионных и аккредитационных требований;
- параметров статистических обследований;
- критериев мониторинга эффективности организаций высшего образования;

– наконец, системы сбалансированных показателей, разработанной самим вузом по отдельным направлениям деятельности.

4. *Реализация стратегии* – это наименее формализованная часть стратегического планирования и наиболее неопределенная с точки зрения конечного результата.

5. *Оценка и контроль стратегии* являются логически завершающим процессом, осуществляемым в стратегическом планировании. Данный процесс обеспечивает устойчивую обратную связь между деятельностью по достижению целей и собственно целями, стоящими перед организацией.

Управление качеством в образовательной организации: ориентиры и практические рекомендации

Внутривузовская система качества является одним из важных элементов стратегического планирования образовательной организации и одновременно средством контроля реализации стратегии.



Рис. 3. Место прогнозирования качества в процессе разработки стратегии образовательной организации

Ориентирами для разработки системы управления качеством выступают требования и рекомендации международного стандарта ISO серии 9001 версии 2015 г., а также следующие модели:

- EFQM (*European Foundation for Quality Management*) – модель Европейского фонда по менеджменту качества [2];
- модель премии Правительства РФ в области качества [11];
- модель Центра исследований политики в области высшего образования (CHERS) университета Твенте (Нидерланды) [7];

- модель ENQA по обеспечению качества высшего образования на базе требований Европейской ассоциации университетов [3];
- типовая модель системы качества образовательного учреждения, разработанная в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» [8].

Данные модели качества положены в том числе в основу и независимой оценки качества высшего образования [10].

Модель EFQM применяется на сегодняшний день более чем в 150 вузах Европы и считается одним из действенных инструментов оценки и совершенствования деятельности современной организации. В ней заложена методика самооценки и самодиагностики организации, исследования управленческого потенциала и определение направлений для совершенствования. Структура данной модели качества предлагает две группы критериев: «Возможности» (лидерство, политика и стратегия, люди, партнерство и ресурсы, процессы) и «Результаты» (результаты для потребителей, результаты для работников, результаты для общества, ключевые результаты деятельности). Первая группа критериев основывается на ключевых параметрах организации, которые позволяют достигать нужных результатов, а вторая группа – это сами показатели и желаемые результаты. Все критерии имеют балльную оценку, в сумме составляющую 1000 баллов: каждая группа одинаково оценивается по 500 баллов, что подчеркивает их равнозначность для процесса управления.

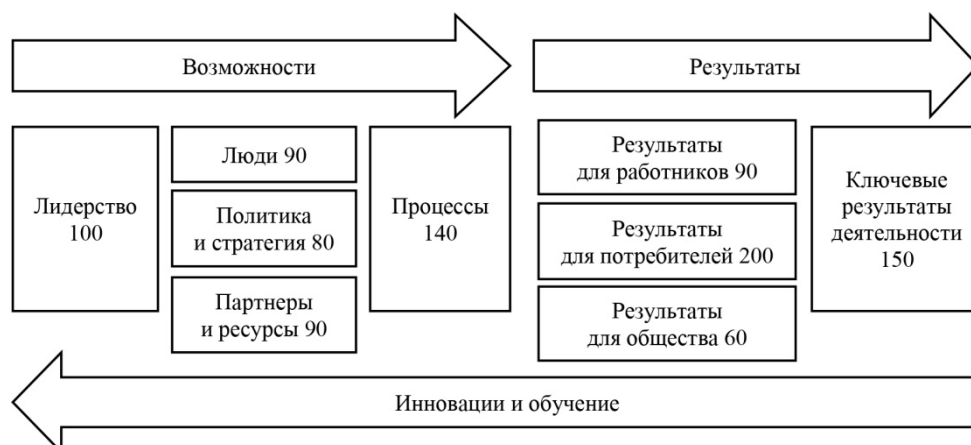


Рис. 4. Модель совершенствования EFQM

Образовательная организация может использовать данную систему самооценки при подготовке документов стратегического планирования как оптимального инструмента анализа внутренней среды.

Внутривузовская система оценки качества образовательной организации предполагает анализ и объективную оценку образовательной деятельности вуза и его структурных подразделений, направленные на получение полной информации о реализации образовательного процесса и его результатах, что позволяет быть готовым к прохождению оценки качества в рамках процедур лицензирования, аккредитации и мониторинга эффективности.

Главной целью внутривузовской системы оценки качества образования является мониторинг качества образования и выявление направлений улучшения качества образования во всех видах деятельности. Внутривузовская система качества должна основываться на следующих принципах, применяемых в современных моделях качества: ориентация на потребителя (студентов, работодателей и др.); ориентация на управление процессами образовательной и научной деятельности; регулярная оценка (самооценка) процессов вуза.

Процесс разработки внутривузовской системы качества образования можно разделить на следующие направления:

1) разработка концепций, целевых установок и задач в области управления качеством в образовательной организации, а также определение видов деятельности, на которые будет направлен контроль.

2) планирование процессов (учебный процесс, научная деятельность, финансовая, хозяйственная и т.д.) и создание условий (планирование ресурсного обеспечения) для их реализации. Определение системы показателей качества для заданных видов деятельности, их применение относительно отдельных объектов управления (контроль качества).

3) проектирование условий для качественной подготовки студентов и их воплощение.

4) самооценка деятельности образовательной организации, включающая мониторинг качества образования, самоанализ, анализ результатов образовательного процесса.

Адаптированная к образовательной организации внутривузовская модель качества на основе EFQM может выглядеть следующим образом:

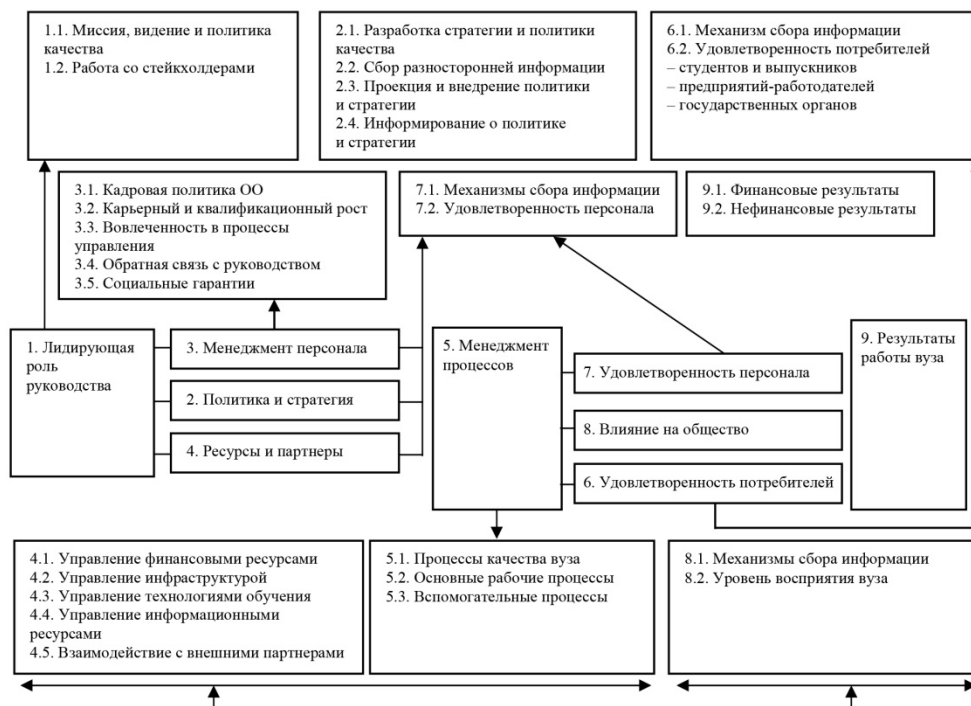


Рис. 5. Внутривузовская модель качества

Заключение

Современные концепции стратегического планирования и управления качеством, разработанные с учетом международных стандартов, позволяют определить комплекс средств и методов для адаптации образовательной организации к условиям неопределенности, высокой конкуренции и меняющихся нормативных рамок. Важным условием является привлечение к процессу планирования основных стейкхолдеров образовательного процесса, создание прозрачной системы отклика на сигналы участвующих сторон, что позволит своевременно корректировать отдельные элементы системы, не нарушая при этом уникальность созданной образовательной среды организации. Система стратегического планирования и управления качеством на современном этапе должна также учитывать требования интернационализации образования и науки, студент-ориентированные концепции управления, публичности разрабатываемых и реализуемых моделей.

В обобщенном виде рекомендации для образовательной организации выглядят следующим образом. Необходимо:

- 1) создать рабочую группу стратегического планирования (руководители вуза, руководители структурных подразделений (факультетов, кафедр, отделов), стейкхолдеры (работодатели, студенты));
- 2) обеспечить систему обратной связи с потребителями, действенность механизмов реагирования на требования внешней среды и своевременную разработку корректирующих мероприятий;
- 3) внедрить модель самодиагностики и регулярность самооценки деятельности образовательной организации (возможно, с опорой на модель EFQM);
- 4) сформировать сбалансированную систему показателей (ССП), демонстрирующих результативность, эффективность и качество рабочих процессов, т.е. квалитетическое обеспечение внутривузовской системы качества;
- 5) обеспечить уровень квалификации экспертов по качеству в сфере знаний и навыков проектирования, интернационального сотрудничества, руководства проектными группами.

Библиографический список

1. ENQA quality assurance professional competencies framework. European Association for Quality Assurance in Higher Education, 2016. – URL: ENQA. [http://www.enqa.eu/indirme/papers-and-reports/occasional-papers/ENQA%20Competencies %20Framework.pdf](http://www.enqa.eu/indirme/papers-and-reports/occasional-papers/ENQA%20Competencies%20Framework.pdf).
2. European Foundation for Quality Management. – URL: <http://efqm.org>
3. The European Association for Quality Assurance in Higher Education (ENQA). – URL: <http://www.enqa.eu/>
4. Ансофф, И. Стратегический менеджмент. Классическое издание / И. Ансофф. – СПб. : Питер, 2009. – 344 с.
5. Босенко, И. В. Методический подход к формированию стратегии, обеспечивающей интенсивное развитие вуза как бизнес-системы / И. В. Босенко, Т. В. Тереньева // Менеджмент в России и за рубежом. – 2017. – № 1. – С. 19–30. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28394737>

6. Валько, Д. В. К вопросу о сущности и структуре стратегического потенциала организации / Д. В. Валько // Управление в современных системах. – 2015. – № 2 (6). – С. 7–18. – URL: http://journal.inueco.ru/6_2015_2/
7. Информационно-справочный портал поддержки систем управления качеством. – URL: <http://www.quality.edu.ru/quality/sk/deskr/modeli/375/>
8. Критерии оценки эффективности и качества управления в системе профессионального образования (российский и зарубежный опыт). – URL: <http://wuz.informio.ru/?id=28545>
9. Методические рекомендации по подготовке стратегий развития отраслей экономики. – URL: <http://economy.gov.ru/minec/about/structure/depstrateg/2017300606>
10. Методические рекомендации по проведению независимой системы оценки качества работы образовательных организаций. – URL: <https://минобрнауки.рф/>
11. Официальный сайт Российской системы качества. – URL: <https://roskachestvo.gov.ru/award/files/rukovodstvo.pdf>
12. Стандарты и рекомендации для обеспечения качества в Европейском пространстве высшего образования (ESG). – URL: http://www.enqa.eu/indirme/esg/ESG%20in%20Russian_by%20NCPA.pdf
13. Федеральный закон от 28.06.2014 N 172-ФЗ (ред. от 31.12.2017) «О стратегическом планировании в Российской Федерации». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841/

Алферова Людмила Владимировна

кандидат экономических наук,
заведующий кафедрой управления
и бизнеса,
Южно-Уральский институт
управления и экономики
E-mail: nauka@inueco.ru

Alferova Ludmila Vladimirovna

candidate of economic sciences,
head of sub-department
of management and business,
South Ural Institute
of Management and Economics

Нагорная Оксана Сергеевна

доктор исторических наук,
проректор по научной работе,
Южно-Уральский институт
управления и экономики
E-mail: nauka@inueco.ru

Nagornaya Oksana Sergeyevna

doctor of historical sciences,
vice-rector for research and science,
South Ural Institute
of Management and Economics

Королева Людмила Анатольевна

доктор педагогических наук,
проректор по учебной работе,
Южно-Уральский институт
управления и экономики
E-mail: nauka@inueco.ru

Koroleva Ludmila Anatolyevna

doctor of pedagogical sciences,
vice-rector for academic affairs,
South Ural Institute
of Management and Economics

УДК 334.02

Алферова, Л. В.

Стратегическое планирование и управление качеством высшего образования: международные стандарты и национальная специфика / Л. В. Алферова, Л. А. Королева, О. С. Нагорная // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 4–17.

ИПО РОССИЙСКИХ КОМПАНИЙ: КЛАССИЧЕСКИЙ И АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПУТИ ПРИВЛЕЧЕНИЯ ИНВЕСТИЦИЙ

А. В. Власов, М. М. Абреков

RUSSIAN IPO: CLASSICAL AND ALTERNATIVE WAYS OF RAISED FUNDS

A. V. Vlasov, M. M. Abrekov

Аннотация. *Актуальность и цели.* Денежные средства и фонды являются важным аспектом деятельности любой организации, только при наличии необходимого объема денежных средств организации могут осуществлять эффективную деятельность, одним из способов привлечения денежных средств в организацию выступает IPO. Цель данной работы заключается в исследовании тенденций IPO российских компаний, определение секторов, являющихся лидерами как по количеству, так и по объему привлеченных денежных средств, сравнение IPO с ICO, определение фондовых бирж, пользующихся наибольшим спросом российских компаний. *Материалы и методы.* Методологической основой послужил теоретический и ретроспективный анализ развития различных форм привлечения инвестиций (IPO и ICO). Основным инструментарием стали общенаучные методы, такие как дедукция, индукция, синтез и логический анализ. *Результаты.* В данной статье определены тенденции на увеличение и уменьшение объема привлеченных средств путем IPO, определены основные биржи, на которых чаще всего российские компании размещают свои акции и депозитарные расписки, рассчитана корреляция между объемом привлеченных средств российскими компаниями и всего по миру путем IPO. *Выводы.* Авторами делаются выводы о сокращении объема привлеченных средств путем IPO, а также о том, что ICO как альтернативный способ привлечения инвестиций имеет хорошую перспективу для технологических стартапов, компаний малого бизнеса.

Ключевые слова: IPO, инвестиции, привлеченные средства, привлечение инвестиций, ICO, ИТО, альтернативные финансы, фондовые биржи.

Abstract. *Background and purpose.* Money and funds are an important aspects of the activities of any organization, only in the presence of the necessary amount of money organizations can carry out effective activities, one of the ways to attract funds to the organization is IPO. The purpose is to study the trends of Russian companies IPOs, identify sectors that are leaders in terms of both the number and volume of attracted funds, the comparison of IPO with ICO, the choices of Russian companies for IPO listings (on stock exchanges). *Materials and methods.* The methodological basis was a theoretical and retrospective analysis of the development of various forms of investment attraction (IPO and ICO). General scientific methods were deduction, induction, synthesis and logical analysis. *Results.* This article identifies the trends for increasing and decreasing the volume of attracted funds by IPO, identifies the main stock exchanges on which most Russian companies place their securities, calculates the correlation between the amount of attracted funds by Russian companies and around the world by IPOs. *Conclusions.* The authors draw conclusions about the reduction of funds raised by IPOs, as well as the fact that the ICO as an alternative way to attract investment has a good prospect for technology startups, small business enterprises.

Key words: IPO, investments, raised funds, attraction of investments, ICO, ITO, alternative finance, stock exchanges.

Введение

В любой компании наступает такой момент, когда собственных средств не хватает для ведения и быстрого развития бизнеса, а заемные средства в виде кредитов остаются весьма «дорогими». В этот момент времени компании решаются «идти на IPO» – проводить первичное публичное размещение акций компании, это может осуществляться в т.ч. в форме депозитарных расписок на акции. Для компаний IPO – это возможность привлечения денег на более выгодных условиях, а для инвесторов, акционеров – это право на участие в управлении компании, возможность получения доли в организации в виде дивидендов.

Изучение тенденций IPO российских компаний

Процедура IPO российских компаний в 21 веке берет свое начало с размещения акций компании МТС на Нью-Йоркской фондовой бирже в июне 2000 г., которая привлекла около 353 млн долл. США. Период 2000–2003 гг. можно охарактеризовать как период, в котором существовал тренд на сокращение объема привлекаемых средств. Основными событиями, предшествовавшими появлению данной тенденции, являются: резкое падение на Nasdaq и крах «новой экономики», теракты в США 11 сентября, а также президентские выборы в России [2].

В период с 2004 по 2007 год значительно увеличилось число компаний, осуществляющих первичное размещение акций (рис. 1). Всего за данный период было осуществлено 80 процедур IPO и привлечено около 64 млрд долларов. Необходимо отметить, что 2007 г. стал рекордным, как по количеству, так и по объему привлеченного капитала. Данный период характеризуется трендом на увеличение объема привлеченных средств. Причинами данной тенденции послужило присваивание России инвестиционного рейтинга S&P, Fitch и положительная динамика темпов роста ВВП [3].

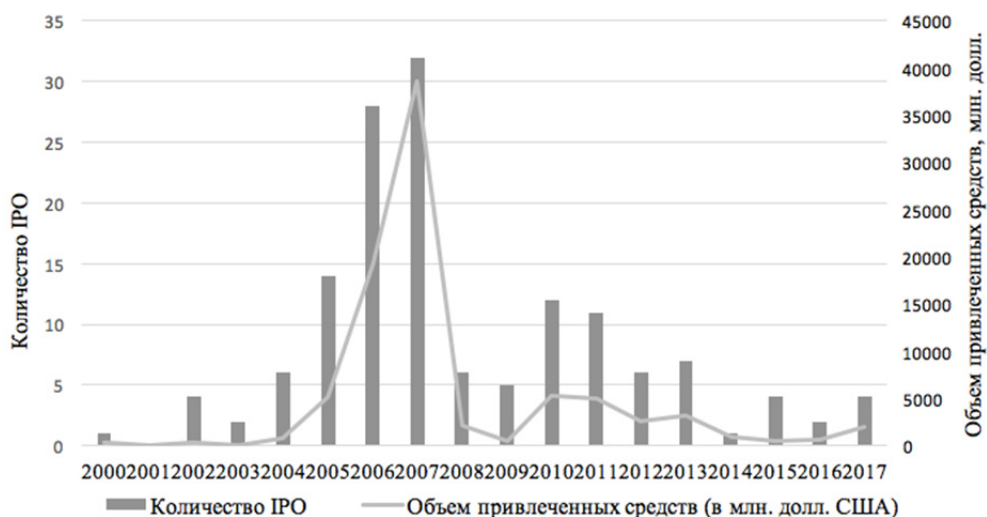


Рис. 1. Количество и объем привлеченных средств путем IPO российских компаний (2000–2017) Источник: Составлено авторами на основе данных [1]

В 2008–2009 гг. количество IPO и объем привлеченных средств сокращался. Главной причиной стал финансовый кризис 2008 г. В данном периоде было проведено 11 процедур IPO на общую сумму 2,7 млрд долл. США.

При дальнейшем изучении диаграммы «Количество и объем привлеченных средств путем IPO российских компаний» (рис. 1) необходимо разделять друг от друга тенденции количества размещений и объема привлеченных средств. Так, в 2010 г. ситуация на рынках начала улучшаться, произошло увеличение количества размещений. В 2010–2016 гг. существовал общий тренд на сокращение количества размещений с некоторой волатильностью в 2012 и 2015 г. Необходимо отметить, что причиной данного явления послужила отрицательная тенденция темпов роста ВВП России.

За тот же период, по объему привлеченных средств можно выделить два периода, в которых существовали различные тенденции, с 2010 по 2015 г. происходило сокращение объема привлеченных средств, что связано с вышеизложенной причиной. С 2016 по 2017 г. наблюдается иная тенденция, мы видим, что объем привлеченных средств начинает увеличиваться.

Для определения связи между объемом привлеченных средств российскими компаниями и объемом привлеченных средств в мире найдем коэффициент корреляции. Он равен 0,69, это говорит о том, что между данными показателями имеется заметная связь. Аналогичная связь имеется между количеством проведенных IPO российскими компаниями и количеством IPO в мире, и коэффициент корреляции составил 0,56.

Анализ IPO российских компаний на различных биржах

Согласно рис. 2 российские компании больше всего предпочитают проводить процедуру первичного размещения на Лондонской фондовой бирже (LSE) и Московской бирже (МБ), что связано с той особенностью, что процедуру проведения первичного размещения пройти легче на данных биржах, чем на иных.

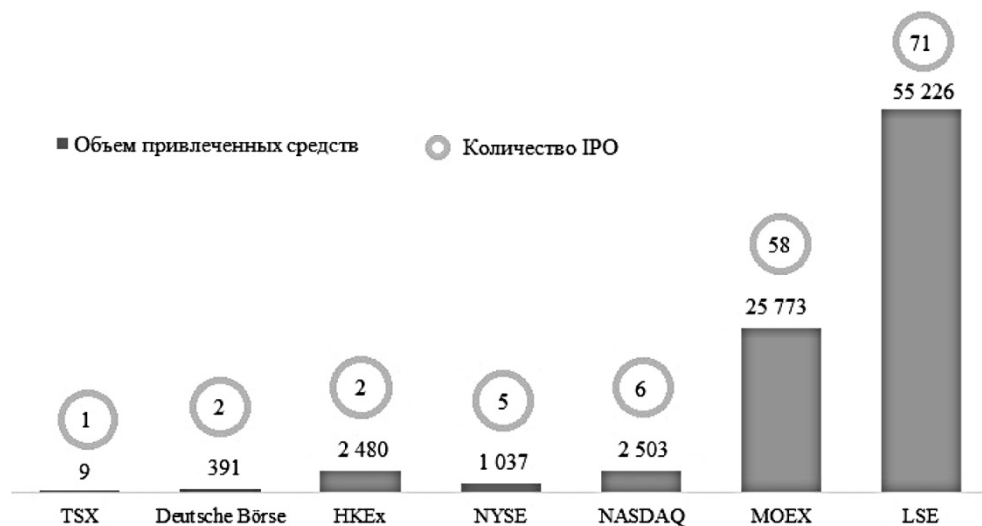


Рис. 2. IPO российских компаний по биржам, по объему привлеченных средств (в млрд долл. США) и количеству (2000–2017) (составлено авторами на основе данных [1])

Изучение данных по количеству и объему привлеченных средств путем IPO российских компаний за период с 2000 по 2017 год показало, что российские компании проводят свое размещение на стандартной площадке. По объему привлеченных средств это составляет 91 % от всех привлеченных средств или 50 млрд долл. США, по количеству 66 % от всех IPO или 47 размещений. Данные по первичным размещениям акций в сегменте «Премиум» дают нам возможность понять, что в данном сегменте процедуру IPO прошли только 6 компаний или 9 % от всех компаний, тогда как эти компании привлекли 3.2 млрд долл. США или 6 % привлеченных средств. На альтернативном инвестиционном рынке было осуществлено 18 процедур IPO или 25 % из всех размещений российских компаний, привлечено 1.6 млрд долл. США, или 3 %.

Таблица 1

Объем привлеченных средств и количество проведенных IPO российских компаний на LSE (составлено авторами на основе данных [1])

Площадка	Количество IPO, ед.	Объем привлеченных средств с помощью IPO, млн долл. США
Основная площадка	53	53,628
Сегмент «Стандарт»	47	50,403
Сегмент «Премиум»	6	3,225
Альтернативный инвестиционный рынок	18	1,598

Необходимо отметить, что такие результаты на LSE были достигнуты из-за простоты проведения «стандартного» IPO. Первичное размещение акций в сегменте «Стандарт» не так сильно затруднено, как размещение в сегменте «Премиум», в частности, к компаниям предъявляются такие требования как: контроль над активами, определенные объемы выручки за предыдущие периоды деятельности, включение в индекс FTSE (от англ. Financial Times Stock Exchange Index, рус. Футси 100) и т.д.

Данные по альтернативному инвестиционному рынку показали такие результаты в связи со своей специализацией, т.к. площадка предназначена для молодых и быстроразвивающихся компаний, к которым применяются упрощенные требования в отношении проведения IPO

Анализ IPO российских компаний по секторам экономики

Основными секторами (в 2000–2017 гг.), в которых было проведено большее количество IPO российских компаний и большее количество привлеченных средств, стали: сектор финансовых услуг, нефтегазовый сектор и металлургическая и горнодобывающая промышленность.

Финансовый сектор стал самым крупным в связи с тем, что в 2007 г. было проведено IPO двух государственных банков – «Сбербанк» и «Банк ВТБ» на суммы 8,800 и 8,019 млн долл. США соответственно. Такое количество IPO было проведено в секторе финансовых услуг, это связано с тем, что

в целом российский рынок, в частности большинство банков, «недокапитализирован»: они нуждаются в привлечении дополнительного капитала, изыскивают возможности для получения наиболее объективной оценки их стоимости, повышения ликвидности капитала [4].

Таблица 2

Распределение объема привлеченных средств путем IPO и количество IPO российских компаний по секторам экономики (2000–2017)
(составлено авторами на основе данных [1])

Сектор экономики	Количество IPO	Объем привлеченных средств, в млн долл. США
Финансовые услуги	17	23,472
Нефтегазовая промышленность	16	15,300
Металлургическая и горнодобывающая промышленность	15	9,358
Розничная торговля	13	3,976
Недвижимость	12	6,487
Высокие технологии и коммуникации	12	6,254
Электроэнергетика	9	9,199
Транспорт и логистика	8	2,875
Фармацевтика и аптеки	8	1,552
Пищевая промышленность	7	1,024
Добыча золота, алмазов и драгоценных камней	5	2,010
Химическая промышленность и удобрения	5	1,677
Развлечения и СМИ	5	990
Агробизнес	4	825
Промышленное производство	4	500
Другие сектора	5	1,920

Следующим сектором экономики является – нефтегазовый. Данный сектор стал одним из самых крупных секторов в связи с тем, что в 2006 г. было проведено самое крупное IPO российской компании на сумму 10,7 млрд долл. США. В данном секторе экономики сосредоточено большое количество предприятий в связи с тем, что РФ занимает шестое место по запасам нефти [5].

Металлургическая и горнодобывающая промышленность занимает третье место как по объему привлеченных средств, так и по количеству IPO. Согласно оценочному мнению авторов, данный сектор занимает соответствующее положение по причине того, что владение активами большинства компаний сохранилось за бизнесом, основанном еще во времена СССР и который в конце XX – начале XXI века был консолидирован; компании проводили процедуры IPO для обновления состава активов.

Наименьший объем привлеченных средств и количество IPO наблюдается в трех секторах: развлечения и СМИ, агробизнес и промышленное производство.

В секторе «развлечения и СМИ» за прошедшие 17 лет было осуществлено около 5 процедур IPO и привлечено 990 млн долл. США. Основная часть компании данного сектора принадлежат государству («Первый канал», «ВГТРК» и др.), а частные компании не имеют достаточной доли рынка для выхода на IPO.

В секторе «агробизнес» произведено 4 процедуры первичного размещения на общую сумму 825 млн долл. США. Для развития и поддержания экономики данного сектора народного хозяйства государство осуществляет помощь представителям сектора (через различные инструменты, например, выдавая льготные кредиты со стороны «Россельхозбанк»), это также объясняет малую вовлеченность предприятий данного сектора экономики в процедуры IPO. Потенциал частного агробизнеса не соответствует целесообразности проведения IPO.

В секторе «промышленное производство» было осуществлено 4 процедуры IPO на сумму 500 млн долл. США. Данный сектор занимает низкие позиции (как и «агробизнес») в связи с тем, что многие предприятия сектора являются государственными корпорациями («ОАК», «Ростехнологии», «Роснано», «ОДК»).

Сравнение IPO с другими способами привлечения средств (ICO)

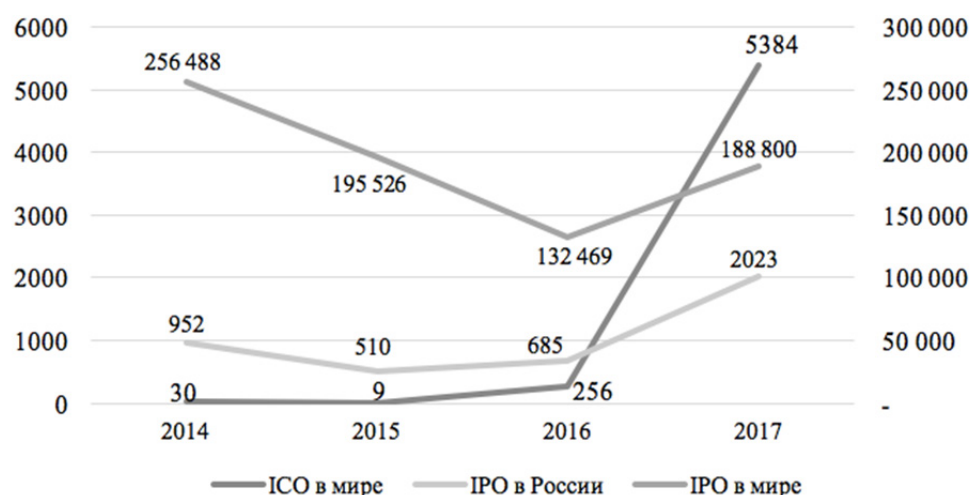
В последние годы в различных СМИ популярным становится понятие ICO, которое начинает принимать все большее значение в мире финансов – альтернативных финансов.

В последнее время в различных СМИ (начиная с 2016 г.) популярным становится понятие ICO, его популяризация очень сильно возросла в 2017 г. (особенно «на пике» в августе-сентябре). Заметим, что данный способ привлечения средств, в первую очередь, актуален для технологических проектов и проводится на раннем этапе появления и развития проекта.

Под ICO (англ. сокр. от Initial Coin Offering), или первичным выпуском токенов, понимается процесс краудфандинга стартапом, который сопровождается эмиссией токенов, проводится с целью привлечения нефиатных (прим. авт.: т.е. bitcoin, ethereum, других криптовалют и токенов) и фиатных средств в бизнес-проект (стартап) на начальном этапе его развития. В связи с использованием термина «токены», которые выпускаются во время ICO, правильное использовать понятие ИТО, или Initial Token Offering (англ. сокр.). По тексту будет сохранено использование понятия «ICO».

ICO можно считать новой формой привлечения инвестиций (инструментом), которая позволяет инвесторам принять участие в ICO и купить токены компании-эмитента и/или обменять их.

Одним из понятий «токена» является его соотнесение с цифровым активом (прим. авторов: или цифровым финансовым активом, как предлагается рассматривать его Банком России и прописано законопроекте «О цифровых финансовых активах»: цифровой финансовый актив – это имущество в электронной форме, созданное с использованием шифровальных (криптографических) средств), которое инвестор получает при покупке/или в обмен на его средства.



Примечание: ось ординат показателя «IPO в мире» расположена справа.

Рис. 3. Объем привлеченных средств путем IPO и ICO (в млн долл. США)
(составлено авторами на основе данных [1, 6–10])

Объем привлеченных средств путем IPO в мире, в течение 2014–2016 гг. ежегодно уменьшался в среднем на 62 млрд долл. США или на 28 %, что было связано с падением цен на нефть, резким падением на рынке IPO Китая, а также спадом мировой экономики [11–13].

В 2017 г. объем привлеченных средств на мировом рынке путем IPO увеличился на 56,3 млрд долл. США или на 42,5 % в связи с улучшением экономических ожиданий у эмитентов.

Объем привлеченных средств путем IPO российскими компаниями в 2015 г. по сравнению с 2014 г. уменьшился на 442 млн долларов или на 46,4 %, что связано с отрицательным темпом роста ВВП. В дальнейшем, в 2016 г. и за 11 месяцев 2017 г. объем привлеченных средств по сравнению с прошлыми годами увеличился на 175 и на 1,338 млн долл. США. Это было связано с формированием у эмитентов положительных ожиданий о будущем экономическом состоянии экономики, в связи с «благополучными прогнозами» Минэкономразвития России.

ICO впервые появилось в 2014 г., за этот год было осуществлено 7 ICO-кампаний на 30 млн долл. США. В дальнейшем, в 2015 г. было привлечено 9 млн долл. США (7 проектов), в 2016 – около 256 млн долларов (43 ICO). Ситуация в 2017 году кардинально изменилась, привлечено 5,384 млн долл. США (по различным данным) за счет проведения 342 процедур ICO.

Предоставленные данные о количестве процедур ICO и IPO, их объемах предоставляют возможность понимания общей картины по классическому и альтернативному рынку привлечения капитала: размер привлеченных средств путем ICO в мире в 2017 году превысил размер *привлеченных средств путем IPO в России*, за тот же период, более, чем в 2,5 раза (рис. 3).

Согласно результатам расчетов, приведенных на рис. 4,а, можно утверждать, что такой инновационный способ привлечения средств для стартапов как ICO начинает пользоваться все большим спросом и имеет хорошие перспективы.

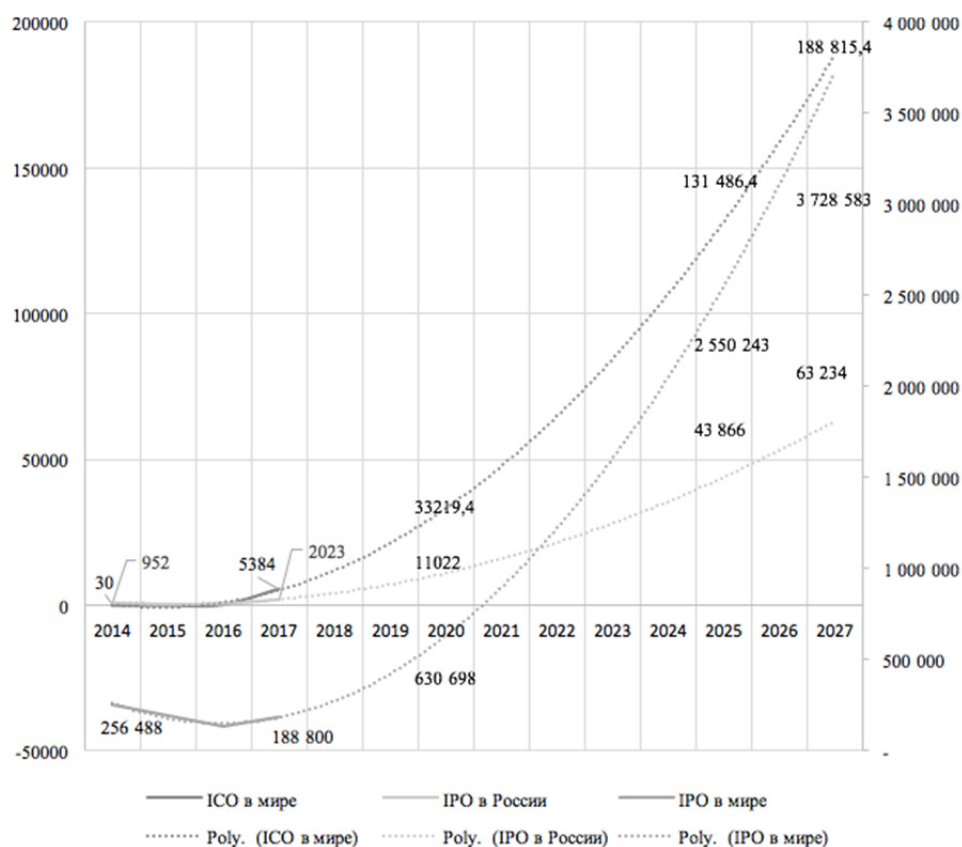


Рис. 4а. Прогноз IPO и ICO до 2027 г. (в млн долл. США)
(ось ординат показателей IPO в мире и Poly. (IPO в мире) расположена справа)
(составлено авторами на основе данных [1, 6–10])

Данный прогноз составлен без учета возможных взаимосвязей с логикой развития технологии согласно «цикла зрелости технологии» (рис. 4,б,в); а также возможных взаимосвязей с изменениями показателей капитализация рынка криптовалют и его волатильности (рис. 4,з).



Рис. 4б. Цикл зрелости технологии, или Gartner Hype Cycle
(источник: <https://habrahabr.ru/post/198506/> (дата обращения: 01.02.2018))

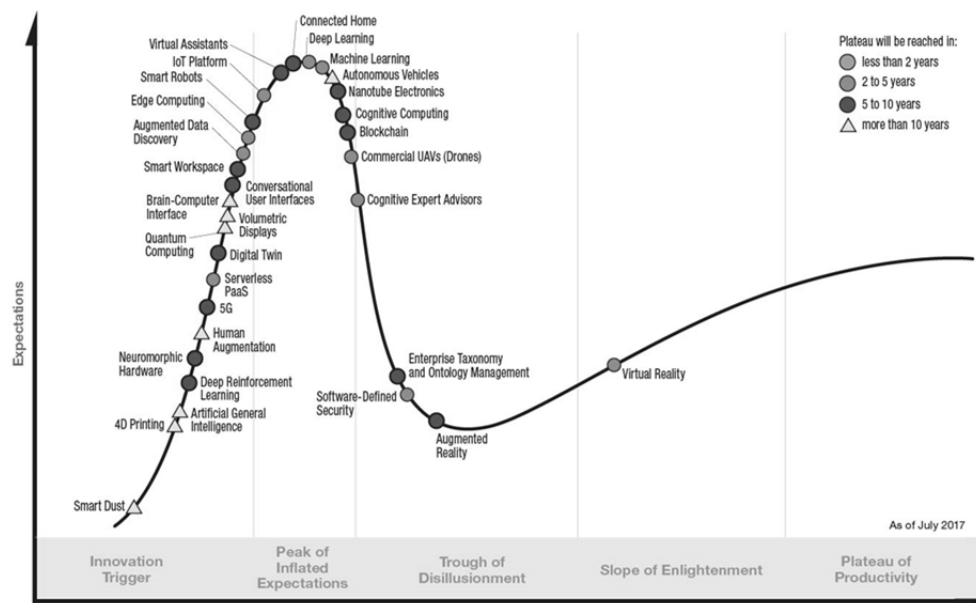


Рис. 4в. Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017 (Источник: Gartner (июль, 2017); <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/> (дата обращения: 01.02.2018))

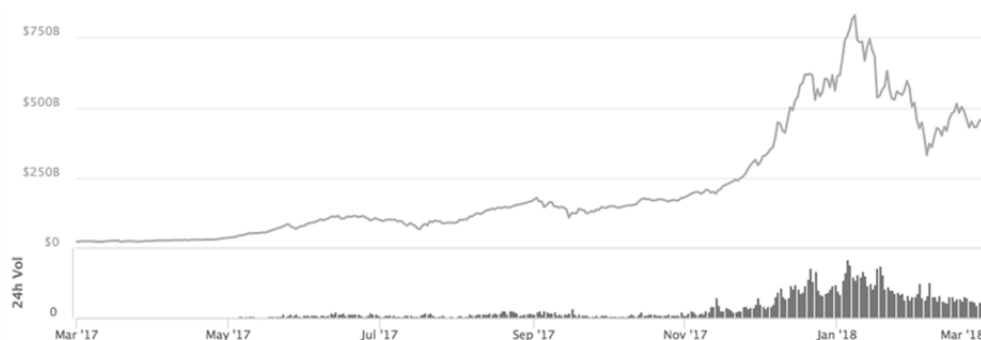


Рис. 4г. Капитализация рынка криптовалют с 01.03.17 по 01.03.18 (в млрд долл. США) (источник: <https://coinmarketcap.com/charts/> (дата обращения: 02.03.2018))

В табл. 3 представлены сравнения IPO и ICO. Были выделены следующие критерии для сравнения – это широта целевой аудитории, размер транзакции; доступность частным лицам; быстрота проведения; требования по регуляции; ликвидность; дивиденды. Знаком «+» (и количеством «+») отмечены наличие критерия и его сила влияния в соотношении IPO и ICO, а «-» – отсутствие характерного критерия для IPO или ICO.

Необходимо отметить, что между IPO и ICO, а именно видами обязательств перед инвесторами, существуют определенные различия: приобретаемые (во время ICO) токены обычно не дают права на владение долями (акциями, активами) проекта, в данном случае речь идет о «продуктовом токене» от англ. utility token, тогда как акции, приобретаемые при IPO, дают инвестору право на определенную долю в активах компании-эмитента.

Таблица 3

Отличия IPO от ICO

Название критерия	IPO	ICO
Вид обязательств – «ценная бумага», в т.ч. дивиденды	+	+/-*
Вид обязательств – «продуктовый токен»	–	+
Широта целевой аудитории, в т.ч. доступность частным лицам (простота участия)	+	++
Размер транзакции, привлекаемых средств	++	+
Быстрота проведения процедуры	+	++
Существующие регуляторные требования по процедуре	++	+/-*
Ликвидность обязательств (индивидуально по каждому проекту)	++	+

П р и м е ч а н и е: * – отмечены критерии, которые затрагивают регуляторные аспекты проведения ICO в различных юрисдикциях, странах инкорпорирования бизнеса; краткому рассмотрению данных особенностей будет приведено ниже.

Источник: Составлено Власовым А. В.

Следующей отличительной чертой ICO является то, что происходит охват большей аудитории, количества людей, чем при проведении IPO. Данная особенность связана с тем, что для приобретения токенов необходимо наличие всего лишь аккаунта (личного кабинета) на сайте проекта, и/или криптовалютного кошелька (в т.ч. кошелька на криптовалютной бирже в случае продажи токенов на бирже во время ICO). Обычно при данном подходе нет минимального порога входа на (участия в) ICO с точки зрения зачисляемых средств, тогда как для приобретения доли компании при IPO необходимо наличие как аккаунта у брокера, так и определенный размер (порог) входа для участия в IPO. Прим.: для открытия аккаунта у профессионального брокера¹ необходимо внести минимальную сумму размером в ~700,000 рублей (эквивалент 10,000 EUR), зачисление которой происходит в течение нескольких дней-недель.

В тоже время, компании, осуществляющие привлечение средств путем предложения акций инвесторам (на IPO), привлекают гораздо больший размер денежных средств (в эквиваленте), чем компании с помощью ICO (прим.: исключения составляют единичные размещения «топовых» по суммам сборов проектов, например, таких как Filecoin, EOS, Bancor, Status, TenX, др. [14]), в большинстве случаев это связано с тем, что инвесторы доверяют акциям, так как за ними стоят определенные активы и история деятельности компании. Более того, токены (имеются в виду utility tokens, которые обычно сами основатели проектов стараются квалифицировать как «продуктовые токены») в отличие от акций не дают их держателям возможностей получения дивидендов (какой-либо финансовой выгоды) и участия в принятии решений компании (голосовании как акционера).

Некоторые государства не признают законность криптовалют (Китай, включая Гонконг; Вьетнам; Бангладеш; Эквадор; Гватемала; Индия) или

¹ Источник: Exante, <https://exante.eu>.

имеют собственное законодательство и мнение национальных регуляторов в отношении трактования ICO-токенов как «ценных бумаг» (США в лице SEC; Канада; Южная Корея; Сингапур), что, по мнению авторов, связано с тем, что государственные органы без определенных регуляторных изменений, сформулированной правовой позиции, финансовых затрат на организацию не могут контролировать (и знать) кто, когда и по какой цене приобрел, продал или обменял токены как напрямую (P2P), так и на крипто бирже. В связи с чем, невозможно определить какой размер дохода получен лицом, осуществляющим инвестиции, для последующего налогообложения его дохода. (прим.: криптовалютные биржи в юрисдикции США пошли по другому пути и для резидентов США – пользователей биржи предложили заполнить налоговую декларацию).

Для осуществления контроля ICO и последующего признания токенов необходимо создание «регулируемой биржи», которая могла бы отчитываться, например, перед регулятором – государственной организацией, в случае рассмотрения РФ данным регулятором может выступить Банк России, который в роли «мегарегулятора» осуществляет надзор за всеми участниками финансового рынка. О подобных векторах развития, действий по введению контроля свидетельствуют последнее официальное заявление SEC от 7.03.20181 (США) и также информационные сообщения от других государственных организаций других стран.

Наконец, ликвидность обязательств, которые получают участники IPO и ICO, напрямую связана с перспективностью технологической идеи проекта и сущностью ICO-токена. По мнению, авторов, IPO с точки зрения юридической прав инвесторов и возможностей их защиты в будущем является более привлекательным, наравне с тем не стоит забывать про спекулятивный потенциал ICO-токенов в краткосрочном периоде, который соотношение показателя «риск-доходность».

Выводы и обсуждения

После изучения всего вышеперечисленного можно сделать следующие выводы:

1. В 2000–2003 гг. и 2010–2015 гг. существовали тренды на уменьшение объема привлеченных средств; в 2004–2007 гг. – тренд на увеличение объема привлеченных средств.

2. Данные по IPO показывают нам, что ситуация на рынке весьма безрадостная. В 2004–2007 гг. объем привлеченных средств в России с помощью IPO увеличивался колоссальными темпами, в среднем, ежегодный прирост составлял 12,576 млн долларов или 257,7 % и составил 11,4 % от мирового показателя, тогда как в 2017 данный показатель составил 1,1 % от мирового показателя.

¹ Источник: US Security and Exchange Commission, <https://www.sec.gov/news/public-statement/enforcement-tm-statement-potentially-unlawful-online-platforms-trading>.

3. Большое количество IPO было проведено на Лондонской фондовой бирже (LSE), в сегменте «Стандарт» и Московской бирже (МБ). На ЛФБ проведено 71 процедур IPO российских компаний на сумму 55,226 млн долларов, тогда как на МБ осуществлено 58 процедур IPO на сумму 25,773 млн долларов.

4. За последние 17 лет лидерами, как по объему привлеченных средств, так и по количеству проведенных IPO, выступили следующие сектора: финансовый и нефтегазовый сектора, металлургическая и горнодобывающая промышленность.

5. Сравнение имеющихся данных, как по IPO, так и по ICO дают нам возможность понять, что рынок ICO развивается и имеет хорошую перспективу в качестве конкурента рынку IPO.

6. На текущий момент ICO не сможет полностью заменить IPO, исходя из этого молодым технологическим предпринимателям не стоит отказываться от альтернативного способа привлечения инвестиций – ICO.

7. IPO – это путь крупного бизнеса по «передаче прав» инвесторам через владение акциями. Это основная характеристика и отличие IPO от ICO: именно право собственности защищают все регуляторы ведущих стран (SEC, FINMA, др.).

А ICO – путь стартапа для быстрого запуска, разработки продукта (MVP) и его тестирования сообществом.

Исследование тематики анализа привлечения инвестиций с помощью альтернативных финансов (ICO) будет продолжено авторами.

Благодарности: авторы выражают благодарность независимому анонимному рецензенту.

Библиографический список

1. Поиск IPO / SPO. – URL: <http://www.preqvesa.ru> (дата обращения: 23.12.2017).
2. Газета Коммерсант от 9 октября 2002 г. № 183.
3. Динамика индекса ММББ и ключевые моменты российской истории // Фондовый рынок. – 2007. – № 176.
4. Что такое IPO банка. – URL: http://www.banki.ru/wikibank/ipo_bank/ (дата обращения: 06.12.2017).
5. Мировые запасы нефти. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Мировые_запасы_нефти (дата обращения: 06.12.2017).
6. Summary Stats. – URL: <https://www.coindesk.com> (дата обращения: 23.02.2018).
7. Global IPO trends: Q4 2017. – URL: [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_Global_IPO_Update_Year-End_2017_-_Dezember_2017/\\$FILE/EY_%20Global_%20IPO_%20Update%202017.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_Global_IPO_Update_Year-End_2017_-_Dezember_2017/$FILE/EY_%20Global_%20IPO_%20Update%202017.pdf) (дата обращения: 23.12.2017).
8. Eyes turn to 2017 for growth as the IPO market still reels from uncertainty in 2016. – URL: <http://www.ey.com/gl/en/newsroom/news-releases/news-ey-eyes-turn-to-2017-for-growth-as-the-ipo-market-still-reels-from-uncertainty-in-2016> (дата обращения: 08.12.2017).
9. IPOs hold their own amidst pressure from alternative funding and global volatility. – URL: <http://www.ey.com/gl/en/newsroom/news-releases/news-ey-ipos-hold-their-own>

amidst-pressure-from-alternative-funding-and-global-volatility (дата обращения: 08.12.2017).

10. Chinese issuers take global IPO markets to 4-year high. – URL: <http://www.ey.com/cn/en/newsroom/news-releases/2014-ey-chinese-issuers-take-global-ipo-markets-to-4-year-high> (дата обращения: 08.12.2017).
11. I квартал ознаменовался спадом на рынке IPO: игроки ждут лучших времен. – URL: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2016/05/19/i-kvartal-oznamenovalsya-spadom-na-rinke-ipo-igroki-zhdut-luchshih-vremen (дата обращения: 06.12.2017).
12. Рынок IPO сжался перед Китаем. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2822408> (дата обращения: 09.12.2017).
13. Данилин, А. А. Проблемы мирового рынка труда, вызванные глобализацией: анализ и возможные пути решения / А. А. Данилин // Новации в экономике и менеджменте. – 2017. – С. 30–33.
14. Jin, S. Cryptoeconomics: Data Application for Token Sales Analysis / S. Jin, R. Ali, A. V. Vlasov // *International Conference Information Systems 2017 Special Interest Group on Big Data Proceedings*. 1. – URL: <http://aisel.aisnet.org/icis2017b/1> (дата обращения: 05.02.2018).

Власов Андрей Васильевич

консультант,
DeMontroyal;
преподаватель,
Национальный исследовательский
университет «Высшая школа
экономики» (НИУ ВШЭ)
E-mail: study@demontroyal.com

Vlasov Andrey Vasilyevich

consultant,
DeMontroyal;
lecturer,
National Research University Higher
School of Economics (NRU HSE)

Абреков Магомед Мекерович

специалист,
DeMontroyal
студент,
Финансовый Университет при
Правительстве Российской Федерации
E-mail: 09maga09@bk.ru

Abrekov Magomed Mekerovich

specialist,
DeMontroyal,
student,
Financial University under the Government
of the Russian Federation

УДК 330, 336

Власов, А. В.

ИРО российских компаний: классический и альтернативный пути привлечения инвестиций / А. В. Власов, М. М. Абреков. А. В. Власов, М. М. Абреков // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2018. – № 1 (25). – С. 18–30.

**СТРУКТУРНЫЕ СДВИГИ В ЭКОНОМИКАХ
СТРАН-ЭКСПОРТЕРОВ НЕФТИ И ГАЗА,
ИМЕЮЩИХ РАЗНУЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ
НАКОПЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА**

Е. В. Перепелкина

**SECTORAL SHIFTS IN THE ECONOMIES OF OIL
AND GAS EXPORTERS HAVING DIFFERING INTENSITY
OF HUMAN CAPITAL ACCUMULATION**

E. V. Perepelkina

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современных условиях накопление человеческого капитала является важнейшим фактором структурного развития. Целью исследования стало установление первоочередных мер по обеспечению прогрессивных структурных сдвигов в экономиках нефтегазодобывающих стран с разной степенью зрелости институционально-рыночной среды. *Материалы и методы.* Информационной базой исследования выступили данные Федеральной службы государственной статистики России и Статистической службы Норвегии. Трехсекторная макроэкономическая модель построена в соответствии с моделью структуры экономики К. Кларка – А. Фишера. Основу методологии составил анализ динамики временных рядов и корреляционно-регрессионный анализ. *Результаты.* Благодаря установлению определяющих динамику доли валовой добавленной стоимости каждого сектора видов экономической деятельности оценена сила их влияния и рассчитаны уравнения производственных функций российской и норвежской экономик. К причинам выявленного межстранового различия в прохождении структурных сдвигов (наряду с отсутствием в Норвегии и присутствием в России негативного влияния эффекта «ресурсного проклятия») отнесено неодинаковое участие человеческого капитала в функционировании национальной экономики. Обеспечивающая расширенное воспроизводство человеческого капитала профессиональная, научная, техническая и образовательная деятельность рассматривается как создающая услуги, способные оказывать положительное синергетическое воздействие на всю экономику. *Выводы.* Процесс избавления от таких форм сырьевой зависимости как «ресурсное проклятие» и «голландская болезнь» охватывает применение одновременно экономических и институциональных мер, соотношение между которыми следует определять с учетом уровня социально-экономического развития страны, что подтвердили результаты сравнительного анализа структурных сдвигов в экономиках России и Норвегии. Осуществление отмеченного в Норвегии сокращения доли первичного сектора за счет усиления воспроизводства человеческого капитала в третичном секторе, в России потребует предварительного проведения глубоких институциональных преобразований.

Ключевые слова: структурные сдвиги, сырьевая специализация, человеческий капитал, «голландская болезнь», «ресурсное проклятие», институты.

Abstract. *Background.* In the current circumstances, accumulation of human capital is a crucial factor for structural development. The objective of the study is to establish primary measures for ensuring progressive structural changes in the economies of oil and gas

producing countries having different degrees of maturity of institutional and market environment. *Materials and methods.* Data of the Russian Federal State Statistics Service and the Norwegian statistics bureau (Statistics Norway) constitute an informational base of the research. A three-sector macroeconomic model is developed according to the Clark and Fisher's model of economic structure. Analysis of time series dynamics as well as correlation and regression analysis comprise a methodological basis. *Results.* The paper identifies types of economic activity defining dynamics of each sector's share in the gross value added, assesses their impact, presents derivation of the equations for production functions of Russian and Norwegian economies. Unequal participation of human capital in the functioning of the national economy is (along with the presence of an adverse «resource curse» effect in Russia and absence of such in Norway) attributed to reasons for the detected differences in structural shifts between countries. Professional, scientific, technical activities and education ensuring an expanded reproduction of human capital are considered as creators of services that, in turn, may provide a positive synergistic effect for the whole economy. *Conclusions.* Disposing of such forms of raw material dependence as «resource curse» and «dutch disease» encompasses simultaneous use of both economic and institutional measures. Results of the comparative analysis of structural changes in the economies of Russia and Norway suggest that the relation between these kinds of measures should be determined with due regard for the level of country's socioeconomic development. Reduction of the primary sector share owing to the reinforced human capital reproduction in the tertiary sector, which is characteristic of Norway, would require profound prior institutional transformations in Russia.

Key words: sectoral shifts, raw material specialization, human capital, «dutch disease», «resource curse», institutes.

Введение

Содержание меж- и внутрисекторных структурных сдвигов составляет происходящее не одномоментно перераспределение экономических ресурсов между частями экономики. Структурные сдвиги происходят из последовательного и достаточно продолжительного развития экономики, поэтому изучать их следует в среднесрочной и долгосрочной перспективе, но никак не в связи с краткосрочными конъюнктурными колебаниями на товарных либо финансовых рынках. Сдвиги в экономике обязательно сопровождают процесс ее развития, а их направления и сила в ряде случаев определяются не только чисто экономическими факторами, но и причинами внеэкономического характера. Одним из таких случаев является обладание страной большими запасами минеральных ископаемых, пользующихся спросом на мировых сырьевых рынках. Данное обстоятельство оказывает на национальную экономику сильное структуроформирующее влияние, последствия которого стали предметом анализа многих ученых.

Исследование механизма частичной деиндустриализации в Нидерландах после начала добычи природного газа, предпринятое в 1981 г. Майклом Элманом [1] и продолженное другими учеными, породило термин «голландская болезнь» (dutch disease) [2, 3]. В 1993 г. Р. М. Аути [4] написал о «ресурсном проклятии» (resource curse) в связи с изучением феномена сравнительно низких темпов экономического роста в странах богатых природными ресурсами. «Голландская болезнь» дает экономическое объяснение возникновению «ресурсного проклятия», главной причиной существования которого все же чаще считают низкое качество институтов в стране [5–7]. Вместе с тем, результаты некоторых исследований не подтверждают широко пред-

ставленное в научных публикациях мнение о преимущественно институциональном происхождении «ресурсного проклятия». Так, изучая группу ресурсобеспеченных стран К. Браншвейлер зафиксировала положительную прямую взаимную связь между обилием природных ресурсов и экономическим ростом при отсутствии отрицательного косвенного воздействия первого на второй через институциональный канал [8]. А проведенный С. Хабером и В. Менальдо [9] эконометрический анализ ситуации в 53 активно эксплуатирующих природные ресурсы авторитарных странах вместо отрицательной корреляции между ростом нефтяных доходов и демократией в странах-нефтеэкспортерах показал наличие слабой положительной связи. К тому же отсутствие среди ученых единства в выборе показателей оценки качества институтов способно повлиять на объективность получаемых результатов, что позволяет утверждать о целесообразности дополнения количественным анализом институциональной трактовки происхождения ресурсного проклятия.

Исходные данные и предварительная оценка направлений межсекторных структурных сдвигов

Представляя собой одно из проявлений структурной деформации экономики, «ресурсное проклятие» заслуживает детального анализа и эконометрического моделирования его характеристик. Исходя из этого подвергнуто исследованию содержание взаимных связей между отдельными частями экономик нефтегазодобывающих стран, при разной степени зрелости институционально-рыночной среды обладающих достаточно весомым промышленным потенциалом.

Содержание табл. 1, в которой секторное разграничение осуществлено в соответствии с моделью К. Кларка – А. Фишера [17, 18], свидетельствует об одинаковом направлении движения в России и Норвегии доли только третичного сектора. Динамика доли и первичного, и третичного секторов в российской и норвежской экономиках имела противоположную направленность. Для определения причин этого обратимся к данным о внутрисекторных структурных сдвигах.

Представленные в табл. 2 четыре вида экономической деятельности рассматриваются как определяющие для прохождения структурных сдвигов в ВДС на межсекторном и внутрисекторном уровнях. В эксплуатирующем природные ресурсы первичном секторе (включает сельское, лесное, рыбное хозяйство и добывающие производства) в качестве таковой принята добыча нефти и газа, во вторичном (обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды, строительство) – обрабатывающие производства, поскольку в ВДС указанных секторов доля обоих видов экономической деятельности заметно превышает 50 %. В третичном секторе (производство услуг) однозначного лидера нет: в российском секторе услуг первенствует оптовая и розничная торговля, ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования, тогда как в норвежском – укрупненный вид экономической деятельности, охватывающий профессиональную, научную, техническую деятельности и образование, главной задачей которого в постиндустриальной экономике является генерация и диффузия человеческого капитала.

Из анализа приведенных в табл. 1 и 2 удельных весов секторов и видов экономической деятельности в ВДС России и Норвегии за период 2000–2016 гг. следует:

- в российской экономике увеличение доли первичного сектора (на 1,1 %) было вызвано почти двукратным ростом доли добычи нефти и газа (с 4,05 % до 8,4 % или на 4,35 %). Обратный процесс двукратного сокращения доли этого сектора в норвежской экономике (с 26,83 % до 15,32 % или на 11,52 %) определялся близким по масштабу уменьшением доли добычи нефти и газа (с 12,68 % до 24,5 % или на 11,82 %);

- происходившее в российской экономике сокращение удельного веса вторичного сектора (на 5,29 %) следовало из аналогичного по направлению и почти такого же по величине изменения удельного веса обрабатывающих производств (на 5,08 %). Величина последнего показателя в норвежской экономике тоже уменьшилась (на 1,89 %), однако доля вторичного сектора стала больше (на 1,48 %) за счет бурного роста входящего в него строительства (удельный вес последнего увеличился на 2,89 % и его величина (6,84 %) вплотную приблизилась к величине удельного веса обрабатывающих производств (7,94 %)). Таким образом, признаки деиндустриализации обнаружены в экономиках обеих стран, но в Норвегии они менее выражены;

- структурный сдвиг в пользу третичного сектора в норвежской экономике был сильнее благодаря опережающему росту услуг, связанных с воспроизводством человеческого капитала. Общий темп роста доли третичного сектора за 17 лет достиг 117,48 %, а доли профессиональной, научной, технической деятельности и образования – 141 %. В российской экономике аналогичный показатель имел примерно вдвое меньшие значения: на уровне сектора составил 107,14 %, на уровне указанного укрупненного вида экономической деятельности – 121,18 %. Движение доли относимой к традиционным видам экономической деятельности со сравнительно низкой производительностью труда оптовой и розничной торговли с рядом сопутствующих им услуг характеризовалось отрицательными значениями в обеих экономиках. В российской экономике ее величина стала меньше на 6,91 %, в норвежской – на 1,07 %, темп роста составил, соответственно, 69,83 % и 88,61 %. Подобные прогрессивные внутрисекторные структурные сдвиги в состоянии послужить дальнейшему расширению сектора услуг в будущем.

Корреляционно-регрессионный анализ структурных сдвигов в российской и норвежской экономиках, их производственные функции

Корреляционно-регрессионный анализ рядов динамики доли первичного сектора и доли добычи нефти и газа в российской ВДС подтвердил существование между ними статистически значимой связи (коэффициент корреляции $(r_{1,1}) = 0,59$). Уравнение регрессии доли первичного сектора по доле добычи нефти и газа выглядит следующим образом:

$$y_1 = a + bx_1 = 11,31 + 0,34x_1, \quad (1)$$

где y_1 – доля первичного сектора; x_1 – доля добычи нефти и газа.

О достоверности уравнения (1) свидетельствует равное 0,35 значение коэффициента детерминации, составляющая 8,11 величина F-критерия Фишера, превысившая критическую при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{табл.}}, F_{\text{табл.}} = 4,54$). Достоверность коэффициентов уравнения следует из больших фактических значений t -критерия ($t_a = 12,52; t_b = 2,85$) по сравнению с критическим ($t_{\text{табл.}} = 2,13$) при одинаковом уровне значимости. Согласно коэффициенту эластичности $(\bar{\epsilon}_{y_1x_1}) = b \frac{\bar{x}_1}{\bar{y}_1} = 0,34 \frac{7,31}{13,83} = 0,18$, отклонение от среднего значения доли добычи нефти и газа на 1 % вызовет отклонение от средней величины доли первичного сектора на 0,18 %.

Взаимная связь изменения доли вторичного сектора и доли обрабатывающих производств в российской ВДС сильнее ранее подвергнутой изучению (коэффициент корреляции $(r_{\text{II},2}) = 0,95$). Уравнение линейной регрессии здесь имеет вид:

$$y_{\text{II}} = c + dx_2 = 13,29 + 0,77x_2 \quad (2)$$

где y_{II} – доля вторичного сектора; x_2 – доля обрабатывающих производств.

Коэффициент детерминации $(R^2) = 0,90$, значение F-критерия Фишера ($F_{\text{факт.}} = 136,03$, значения критерия Стьюдента для коэффициентов регрессии ($t_c = 12,72; t_d = 11,66$) свидетельствуют о статистической значимости уравнения (2). Коэффициент эластичности $(\bar{\epsilon}_{y_{\text{II}}x_2}) = d \frac{\bar{x}_2}{\bar{y}_{\text{II}}} = 0,77 \frac{15,79}{25,39} = 0,48$, т.е. изменение на 1 % от среднего значения доли обрабатывающих производств вызовет изменение на 0,48 % от средней величины доли вторичного сектора.

Это подтверждает обоснованность предположения о движении объемов добавленной стоимости обрабатывающих производств как определяющем факторе трансформации вторичного сектора российской экономики.

При факторном анализе динамики удельного веса в экономике третичного сектора потребовалось оценить влияние не одного, а двух входящих в него видов экономической деятельности. Ими выступили оптовая и розничная торговля, ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования, а также профессиональная, научная, техническая и образовательная деятельность. Взаимной связи динамики доли третичного сектора с динамикой доли профессиональной, научной, технической и образовательной деятельности установить не удалось. Зато обнаружена сильная корреляция временных рядов доли третичного сектора с долей оптовой и розничной торговли с некоторыми сопутствующими им услугами ($r_{\text{III},3} = 0,70$). Статистически значимо уравнение парной линейной регрессии;

$$y_{\text{III}} = e + fx_3 = 72,62 - 0,62x_3, \quad (3)$$

где y_{III} – доля третичного сектора; x_3 – доля оптовой и розничной торговли с сопутствующими им услугами.

$$\text{Отрицательное значение коэффициента эластичности } (\bar{\epsilon}_{y_{III}x_3}) = f \frac{\bar{x}_3}{\bar{y}_{III}} =$$

$$= -0,62 \frac{19,24}{60,79} = -0,19 \text{ указывает, что рост на 1 \% средней величины удельно-}$$

го веса оптовой и розничной торговли с некоторыми сопутствующими им услугами вызовет снижение на 0,19 % среднего удельного веса третичного сектора.

В результате производственная функция российской экономики приняла следующий вид:

$$Y_R = y_I + y_{II} + y_{III} = (a + bx_1) + (c + dx_2) + (e + fx_3) =$$

$$(11,31 + 0,34x_1) + (13,29 + 0,77x_2) +$$

$$+(72,62 - 0,62x_3) = 97,22 + 0,34x_1 + 0,77x_2 - 0,62x_3, \quad (4)$$

где y_I , y_{II} , y_{III} – доли, соответственно, первичного, вторичного и третичного секторов; x_1 – доля добычи нефти и газа; x_2 – доля обрабатывающих производств; x_3 – доля оптовой и розничной торговли с сопутствующими им услугами.

Изменение на один процент переменной уравнения (4) вызывает соответствующий ее коэффициенту процент изменения ВДС. Например, увеличение доли добычи нефти и газа на 1 % ведет к приросту ВДС в среднем на 0,34 %. В соответствии с величинами коэффициентов, самое сильное воздействие на размер ВДС должно исходить от изменений доли обрабатывающих производств.

Аналогичным образом корреляционно-регрессионный анализ взаимозависимости динамических рядов доли в ВДС секторов и входящих в них избранных видов экономической деятельности был проведен и в отношении норвежской экономики. Установлена статистическая значимость с уровнем значимости (α) равным 0,05 полученных уравнений регрессии и их коэффициентов, описывающих динамику долей секторов в ВДС по экономике Норвегии. Главным выявленным отличием от экономики России здесь выступило присутствие взаимосвязи изменений, с одной стороны, доли профессиональной, научной, технической и образовательной деятельности и, с другой стороны, доли третичного сектора.

Формула производственной функции норвежской экономики выглядит следующим образом:

$$Y_N = y_I + y_{II} + y_{III} = (a + bx_1) + (c + dx_2) + (e + fx_4) =$$

$$(4,88 + 0,87x_1) + (13,21 + 0,36x_2) +$$

$$+(28,25 + 3,63x_4) = 46,34 + 0,87x_1 + 0,36x_2 + 3,63x_4, \quad (5)$$

где y_I , y_{II} , y_{III} – доли, соответственно, первичного, вторичного и третичного секторов; x_1 – доля добычи нефти и газа; x_2 – доля обрабатывающих производств; x_4 – доля профессиональной, научной, технической и образовательной деятельности.

Согласно коэффициентам переменных производственной функции (5), рост ВДС в наибольшей мере зависит от результатов профессиональной, научной, технической деятельности и образования. Второй по степени влияния является добыча нефти и газа, а последнее место с близким к трехкратному отставанием занимают обрабатывающие производства.

В табл. 3 приведены результаты корреляционно-регрессионного анализа изменений в структуре российской и норвежской экономик.

Таблица 3

Регрессионная статистика сдвигов в структуре
ВДС российской и норвежской экономик

Страна	Уравнение	r	R^2	$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{табл.}}$	t_1	t_2	$t_{\text{табл.}}$	Θ
Первичный сектор									
Россия	$y_{1R} = a + bx_1 =$ $= 11,31 + 0,34x_1$	0,59	0,35	8,11	4,54	12,52	2,85	2,13	0,18
Норвегия	$y_{1N} = a' + b'x_1 =$ $= 4,88 + 0,87x_1$	0,91	0,83	73,61		2,20	8,58		0,79
Вторичный сектор									
Россия	$y_{2R} = c + dx_2 =$ $= 13,29 + 0,77x_2$	0,95	0,90	136,0	4,54	12,72	11,66	2,13	0,48
Норвегия	$y_{2N} = c' + d'x_2 =$ $= 13,21 + 0,36x_2$	0,64	0,41	10,29		12,91	3,21		0,20
Третичный сектор									
Россия	$y_{3R} = e + fx_3 =$ $= 72,62 - 0,62x_3$	-0,70	0,48	14,12	4,54	22,89	-3,76	2,13	-0,19
Норвегия	$y_{3N} = e' + f'x_4 =$ $= 28,25 + 3,63x_4$	0,85	0,72	38,65		5,53	6,22		0,53

При общей сырьевой направленности экспорта величина коэффициента эластичности удельного веса первичного сектора по удельному весу добычи нефти и газа в норвежской экономике (0,79) многократно больше российской (0,18). В сочетании с высокой относительной чувствительностью к добыче нефти и газа на величину добавленной стоимости первичного сектора в Норвегии угнетающе влияло происходившее в рассматриваемый период времени сокращение физических объемов добычи этих углеводородов [19]. Наоборот, в России наблюдался их умеренный рост, в условиях большой волатильности цен на нефть способствовавший стабилизации динамики стоимостных показателей итогов функционирования первичного сектора. Существующий разрыв в уровнях социально-экономического развития этих стран прежде всего проявился в принципиально разной силе влияния профессиональной, научной, технической и образовательной деятельности на долю третичного сектора в ВДС: корреляция в норвежской экономике была сильной, в российской оказалась пренебрежимо малой.

Результаты расчетов подтверждают существование возможности общеэкономически эффективного замещения сырьевых производств технологически более передовой деятельностью в третичном секторе по созданию услуг со значительной добавленной стоимостью и с переходящим на другие секто-

ры позитивным синергетическим эффектом. Пример Норвегии, где обильное финансирование науки и образования расширяет и интенсифицирует процесс воспроизводства человеческого капитала, показывает реальный путь продвижения к лучше структурно сбалансированной экономике, в которой национальные производители достаточно конкурентоспособны на внутреннем и международных рынках не только сырьевых, но и высокотехнологичных продуктов.

В обоснование приведенного утверждения средствами корреляционно-регрессионного анализа дана оценка взаимной связи между динамикой созданного продукта в первичном секторе и формированием человеческого капитала в третичном секторе. Экономика Норвегии характеризуется присутствием обратной корреляционной связи ($r_{1,4} = -0,79$) между удельным весом в ВДС страны первичного сектора и укрупненного вида экономической деятельности, включающего профессиональную, научную, техническую деятельности и образование. Направления изменения величин изучаемого показателя противоположны, т.е. с увеличением доли профессиональной, научной, технической деятельности и образования уменьшается доля первичного сектора в ВДС. Полученное уравнение парной линейной регрессии статистически значимо при $\alpha = 0,05$ ($F_{\text{факт.}} = 24,59$):

$$y_1 = g' + h'x_4 = 53,25 - 3,40x_4. \quad (6)$$

Связь между переменными уравнения (6) существует, однако модель не полностью описывает исходные данные (коэффициент детерминации (R^2) = 0,62). Значение рассчитанного следующим образом $\bar{\Theta}_{y_1x_4} = h \frac{\bar{x}_4}{\bar{y}_1} =$

$$= -3,40 \frac{8,71}{23,65} = -1,25 \text{ коэффициента эластичности свидетельствует о том,}$$

что при увеличении среднего значения доли профессиональной, научной, технической деятельности и образования на 1 % произойдет уменьшение средней доли первичного сектора на 1,25 %. В российской экономике зависимость между удельными весами первичного сектора и изучаемого укрупненного вида деятельности третичного сектора не выражена ($r_{1,4} = -0,09$). Данный вывод подтверждают малое значение коэффициента детерминации линейной регрессии и ее статистическая незначимость ($F_{\text{факт.}} = 0,13 < F_{\text{табл.}} = 4,54$).

В норвежской экономике присутствует возможность заметного снижения удельного веса первичного сектора за счет интенсификации воспроизводства человеческого капитала в третичном секторе, тогда как в российской экономике описываемая связь настолько слаба, что не позволяет сейчас иметь аналогичные структурные последствия от дополнительных инвестиций в профессиональную, научную, техническую деятельность и образование. Усиления влияния происходящего в третичном секторе накопления человеческого капитала на связанные с эксплуатацией природных ресурсов производства следует ожидать после проведения в России общеэкономических и институ-

циональных преобразований, направленных, с одной стороны, на воспрепятствование истощению человеческого капитала, а с другой стороны, на формирование общих рамочных условий ведения конкуренции за финансовые, трудовые и технологические ресурсы представителей разных секторов экономики вне зависимости от формы их собственности и близости к представителям государственной власти.

Накопление человеческого капитала и совершенствование институтов как способы уменьшения зависимости от добычи и экспорта сырья

Достижимое в Норвегии уменьшение доли первичного сектора за счет усиления воспроизводства человеческого капитала в третичном секторе, в России без проведения глубоких общеэкономических, структурных и институциональных реформ не представляется возможным. Выбор мер совершенствования секторной структуры в этих странах следует осуществлять исходя из того, что норвежская экономика нуждается в излечении от «голландской болезни», а российская – от «ресурсного проклятия». Такое представление имеет место во многих научных исследованиях. В публикациях зарубежных ученых сырьевую специализацию внешнеэкономической деятельности в применении к России объясняют главным образом влиянием институциональных причин, в частности, несовершенством правовой системы [20–22], в то время как в случае Норвегии первоочередному рассмотрению подвергаются проблемы повышения инновационной активности [23]. Позиция многих отечественных ученых в данном вопросе близка выраженной А. Л. Кудриным и Е. Т. Гурвичем. Ссылаясь на исследование Маасаки Кубоницы, они сделали предположение о наличии в 2000-е гг. в российской экономике лишь отдельных симптомов «голландской болезни» (а именно, опережающего роста неторгуемого сектора) без ее «существенных проявлений», однако при очевидном действии эффекта «ресурсного проклятия» [24, С. 15–16]. Отмечая существование в период 1999–2008 гг. связи между, с одной стороны, более быстрым ростом ВВП в России по сравнению с большинством богатых природными ресурсами стран и, с другой стороны, непрерывным повышением цен на нефть, японский ученый предупреждал о рисках «высокой нестабильности и волатильности» российской экономики в случае ускорения ее диверсификации с целью избавления от нефтяной зависимости [25]. Однако, описанная М. Кубоничей страновая особенность протекания «голландской болезни» даже в российских условиях представляет собой лишь частный случай, поскольку она не наблюдается при снижающихся либо неизменных ценах на нефть.

Вопреки представлениям указанных ученых статистические данные показывают присутствие деиндустриализации как главного признака «голландской болезни» в экономиках обеих стран, причем если в Норвегии доля обрабатывающих производств в ВДС страны сократилась на 1,89 % (с 9,83 % в 2000 г. до 7,94 % в 2016 г.), то в России – на 5,08 % (с 18,8 % до 13,72 % за аналогичный период времени). Критически значимым для доли обрабатывающих производств оказался 2008 г., когда она под влиянием мирового экономического кризиса сопровождалась сильным снижением цен на нефть

ускорила свое падение. Тогда же доля добычи нефти и газа в норвежской экономике резко пошла вниз (с 27,6 % в 2008 г. до 12,68 % в 2016 г., т.е. уменьшилась на 14,92 %), а в российской – вверх (с 7,38 % в 2008 г. до 8,04 в 2016 г., т.е. увеличилась на 0,66 %). Одинаковые внешнеэкономические условия по-разному действовали на рассматриваемые национальные экономики: в одной произошло замещение природоинтенсивной деятельности более технологически и экологически прогрессивными видами экономической деятельности, в другой, наоборот, добыча нефти и газа продолжила свою экспансию. К причинам выявленного межстранового различия в прохождении структурных сдвигов (наряду с отсутствием в Норвегии и присутствием в России негативного влияния эффекта «ресурсного проклятия») следует отнести связанное не только с обилием природных ресурсов неодинаковое участие человеческого капитала в функционировании национальной экономики. Одним из позитивных результатов более масштабного накопления и эффективного использования человеческого капитала в российской экономике стало бы реальное решение актуализировавшейся при относительно низких ценах на нефть задачи ее избавления от сырьевой зависимости в рамках международного разделения труда.

Изучение структурной динамики национальных экономик со схожей специализацией экспорта, но разными уровнями развития показало наличие общих проблем и различия в путях их решения. Корреляционно-регрессионный анализ, наряду с расчетом линейных моделей взаимосвязи между долями секторов в российской и норвежской экономиках в 2000-е гг., подтвердили наличие негативных последствий из-за внешнеторговой специализации на поставках сырьевых товаров. Самой сильной связью при межсекторном взаимодействии в экономиках России и Норвегии оказалась обратная зависимость между динамикой долей первичного и третичного секторов. Опережающий рост сектора услуг наблюдался в обеих национальных экономиках, тогда как количественные признаки деиндустриализации – только в российской. Произошедшее в Норвегии существенное сокращение доли первичного сектора при увеличении долей вторичного и третичного секторов доказывает возможность одновременного прохождения реиндустриализации и терциаризации в развитой экономике, избавляющейся от стратегически невыгодной сырьевой специализации в экспорте.

Заключение

Благодаря установлению определяющих динамику доли ВДС каждого сектора видов экономической деятельности оценена сила их влияния и рассчитаны уравнения производственных функций российской и норвежской экономик. Это позволило доказать возможность преодоления зависимости от экспорта сырья посредством расширения производства прогрессивных услуг с большой добавленной стоимостью, способных оказывать положительное синергетическое воздействие на всю экономику. Профессиональную, научную, техническую и образовательную деятельность можно рассматривать как создающую такие услуги, поскольку прежде всего ими обеспечивается расширенное воспроизводство человеческого капитала. Если в Норвегии мас-

штабное замещение деятельности в первичном секторе интенсивно использующим человеческий капитал производством услуг в третичном секторе уже стало реальным явлением, то для реализации данного структурного маневра в России необходимо прежде осуществить способствующую этому модернизацию институтов экономики и общества.

Библиографический список

- 1 Ellman, M. Natural Gas, Restructuring and Re-Industrialization: The Dutch Experience of Industrial Policy / M. Ellman // In: T. Barker, V. Brailovsky (ed.). Oil or Industry?: Energy, industrialization and economic policy in Canada, Mexico, the Netherlands, Norway and the United Kingdom. – London : Academic Press, 1981. – P. 149–166.
- 2 Cherif, R. The Dutch Disease and the Technological Gap / R. Cherif // Journal of Development Economics. – 2013. – Vol. 101, № . 1. – P. 248–255.
- 3 Van der Marel, E. Beyond Dutch disease / E. van der Marel, I. Dreyer // Economics of Transition. – 2014. – Vol. 22, № . 4. – P. 341–364.
- 4 Auty, R. M. Sustaining development in mineral economies: The resource curse thesis / R. M. Auty. – London ; New York : Routledge, 1993. – 272 p.
- 5 Ploeg, F. Natural resources: curse or blessing? / F. Ploeg // Journal of Economic Literature. – 2011. – Vol. 49, № . 2. – P. 366–420.
- 6 Bjorvatn, K. Resource Curse and Power Balance: Evidence from Oil-Rich Countries / K. Bjorvatn, M. R. Farzanegan, F. Schneider // World Development. – 2012. – Vol. 40, № 7. – P. 1308–1316.
- 7 Kojo, N. C. Demystifying Dutch Disease / N. C. Kojo // Journal of International Commerce, Economics and Policy. – 2015. – Vol. 6, № . 2. – P. 3–24.
- 8 Brunnschweiler, C. N. Cursing the Blessings? Natural Resource Abundance Institutions, and Economic Growth / C. N. Brunnschweiler // World Development. – 2008. – Vol. 36, № . 3. – P. 399–419.
- 9 Haber, S. Do Natural Resources Fuel Authoritarianism? A Reappraisal of the Resource Curse / S. Haber, V. Menaldo // American Political Science Review. – 2001. – Vol. 105, № 1. – P. 1–26.
- 10 Федеральная служба государственной статистики. – URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/vvp/vvp-god/tab10.htm (дата обращения: 23.11.2017).
- 11 Федеральная служба государственной статистики. – URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/vvp/tab11c.xls (дата обращения: 23.11.2017).
- 12 Федеральная служба государственной статистики. – URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/b05_13/IssWWW.exe/Stg/11-09.htm (дата обращения: 23.11.2017).
- 13 Федеральная служба государственной статистики. – URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/b05_13/IssWWW.exe/Stg/11-08.htm (дата обращения: 23.11.2017).
- 14 Statistics Norway, – URL: <http://www.ssb.no/en/nasjonalregnskap-og-konjunkturer/statistikker/nr/aar/2017-02-09?fane=tabell&sort=nummer8tabell=294901> (дата обращения: 25.11.2017).
- 15 Statistics Norway – Oslo : Statistical Yearbook of Norway, 2013. – P. 249–255.
- 16 Statistics Norway – Oslo : Statistical Yearbook of Norway, 2006. – P. 249–255.
- 17 Clark, C. G. The Conditions of Economic Progress / C. G. Clark. – London : Macmillan, 1940. – 504 p.
- 18 Fischer, A. G. B. Production, Primary, Secondary and Tertiary / A. G. B. Fischer // Economic Record. – 1939. – Vol. 15. – P. 24–38.

- 19 Perepelkin, V. Reduction of an Economy's Raw Material Dependence and the Human Capital of a Country / V. Perepelkin, E. Perepelkina // Comparative Economic Research. – 2017. – Vol. 20, № 1. – P. 53–73.
- 20 Covi, G. Dutch disease and sustainability of the Russian political economy / G. Covi // Economics and Policy of Energy and the Environment. – 2014. – Vol. 2, № 2. – P. 75–110.
- 21 Dülger, F. Is Russia Suffering from Dutch Disease? Cointegration with Structural Break // F. Dülger, K. Lopcu, A. Burgaç, E. Balli // Resources Policy. – 2013. – Vol. 38, № 4. – P. 605–612.
- 22 Sachs, J. The curse of natural resources / J. Sachs, A. Warner // European Economic Review. – 2011. – Vol. 5–6, № 45. – P. 827–838.
- 23 Fageberg, J. The evolution of Norway's national innovation system / J. Fageberg, D. Mowery, B. Verspagen // Science and Public Policy. – 2009. – Vol. 36, № 6. – P. 431–444.
- 24 Кудрин, А. Новая модель роста российской экономики / А. Кудрин, Е. Гурвич // Вопросы экономики. – 2014. – № 12. – С. 4–36.
- 25 Kuboniwa, M. Diagnosing the «Russian Disease»: Growth and Structure of the Russian Economy / M. Kuboniwa // Comparative Economic Studies. – 2012. – Vol. 54, № 1. – P. 121–148.

Перепелкина Елена Вячеславовна
аспирант,
Самарский государственный экономический университет
E-mail: slavaap@rambler.ru

Perepelkina Elena Vyacheslavovna
postgraduate student,
Samara State University of Economics

УДК 330.341.42

Перепелкина, Е. В.

Структурные сдвиги в экономиках стран-экспортеров нефти и газа, имеющих разную интенсивность накопления человеческого капитала / Е. В. Перепелкина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 31–44.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ СЕРВИСНОЙ ЛОГИСТИКИ ПРИ ОКАЗАНИИ УСЛУГ ИНДУСТРИИ КУЛЬТУРЫ

Т. Н. Скоробогатова, А. В. Шейко

THE USE OF THE SERVICE LOGISTICS WHILE RENDERING SERVICES IN THE CULTURAL INDUSTRY

T. N. Skorobogatova, A. V. Sheyko

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальным экономическим направлением в настоящее время выступает логистика, основные положения которой используются в управлении и сферой услуг, где выделилась новая логистическая магистраль – сервисная логистика, представляющая собой управление потоками потребителей и обслуживающими их потоками: кадровыми, материальными, информационными, финансовыми. Целью статьи является рассмотрение возможности применения концепции логистики к потокам пользователей услугами культуры. *Материалы и методы.* Обоснована необходимость применения положений методологии сервисной логистики при оказании услуг культуры. *Результаты.* Охарактеризованы потребители и доноры как основные человеческие потоки, действующие в сфере услуг культуры. Выявлены особенности пожилых людей в аспекте потребления услуг культуры. Проведена конкретизация особенностей людей как потокообразующих элементов в сфере культуры, выявлены особенности применения принципов логистики в сфере потребления услуг индустрии культуры. *Выводы.* Обоснованы выводы: 1. В силу стремления человека приобщиться к прекрасному, подняться на более высокую ступень развития, услуги культуры всегда востребованы. Их результат связан с сознанием человека и носит невещественный характер, что определяет их социальную значимость. 2. В условиях экономического кризиса не все слои общества могут воспользоваться услугами культуры. Необходимо разработать систему льгот для малоимущих граждан касательно как цены билетов на зрелищные мероприятия, так и перемещения к месту их проведения. 3. Проблемы организации обслуживания и управления потоками потребителей услуг культуры необходимо решать с использованием положений активно развивающейся сервисной логистики, выросшей из логистического сервиса и выделившейся в отдельную логистическую ветвь. Применение здесь принципов сервисной логистики позволит предоставлять услуги культуры на качественно новом уровне.

Ключевые слова: сфера услуг, сервисная логистика, принципы логистики, услуги культуры, потребители услуг культуры.

Abstract. *Background.* The actual economic direction is currently logistics, the main provisions of which are used in the management and service sector, where a new logistics highway – service logistics, which is the management of consumer flows and serving their flows: personnel, material, information, financial. The purpose of the article is to consider the possibility of applying the concept of logistics to the flow of users of cultural services. *Materials and methods.* The necessity of application of the provisions of the methodology of service logistics in the provision of services culture. *Results.* Consumers and donors are

characterized as the main human flows operating in the sphere of cultural services. The peculiarities of elderly people in the aspect of consumption of cultural services are revealed. The specificity of the features of people as the flow-forming elements in the sphere of culture, the peculiarities of the application of the principles of logistics in the sphere of consumption of services of the cultural industry. *Conclusions.* Justified conclusions: 1. Due to the desire of a person to join the beautiful, to rise to a higher level of development, cultural services are always in demand. Their result is associated with the human consciousness and is unnatural, which determines their social significance. 2. In times of economic crisis, not all sectors of society can benefit from the services of culture. It is necessary to develop a system of benefits for low-income citizens regarding both the price of tickets for entertainment events and travel to the venue. 3. The problems of the organization of service and management of the flow of consumers of cultural services must be solved using the provisions of actively developing service logistics, which grew out of the logistics service and stand out in a separate logistics branch. Application of the principles of service logistics here will allow to provide cultural services at a qualitatively new level.

Key words: sphere of services, service logistics, principles of logistics, cultural services, consumers of cultural services.

Актуальным экономическим направлением в настоящее время выступает логистика, основные положения которой используются в управлении многими видами деятельности. Такое положение касается и сферы услуг, где выделилась новая логистическая магистраль – сервисная логистика, представляющая собой управление потоками потребителей и обслуживающими их потоками: кадровыми, материальными, информационными, финансовыми. Причина образования перечисленных потоков в том, что большинство услуг не может оказываться на расстоянии, а возможная передача несравнима с непосредственным потреблением. Такое положение прямо касается услуг культуры. Действительно, ряд концертов и театральных спектаклей демонстрируется по телевизору, однако многие зрители преодолевают расстояния, порой немалые, чтобы посмотреть представление «вживую». Кроме получения энергии, исходящей от исполнителей, зрители имеют возможность общения с людьми, близкими им по интересам. В сферу применения логистики также включаются потоки людей, посещающих картинные галереи и другие выставки.

Поскольку особенностью использования услуг культуры вне дома является их коллективное потребление, реально говорить о потоках потребителей и использовании здесь логистических принципов. Целью статьи является рассмотрение возможности применения концепции логистики к потокам пользователей услугами культуры.

Предоставление и потребление услуг культуры имеет определенную специфику. Она проявляется в том, что результат предоставления и потребления услуг не носит, как правило, овеществленный характер. Он связан с сознанием человека, которое является исключительным (речь идет о восприятии, понимании, мышлении, переживании), т.е. результат не может быть прямо посчитан, складирован и т.д.

Результаты материального производства обычно уничтожаются в процессе потребления (одежда изнашивается, продукты питания съедаются).

В отличие от них, культурным ценностям в процессе потребления свойственно наращивание своей значимости (в зависимости от того, сколько людей прочитали книгу, видели картину, слышали концерт и т. п., – их социальная значимость повышается) [1].

Под понятием «услуги в сфере культуры» на современном этапе следует понимать, как услуги, предоставляемые непосредственно потребителям, так и донорам, которые выделяют средства и поддерживают эту деятельность. Сфера культуры является сферой, в которой осуществляется в основном некоммерческая деятельность. Это говорит о том, что денежные средства здесь появляются, как правило, не на основе коммерции, а путем привлечения интересов самых разных субъектов, к которым относятся: органы власти, в распоряжении которых находятся бюджетные средства, спонсоры, благотворительные организации и прочие доноры.

В свете подобных обстоятельств, логистика сферы услуг культуры имеет определенные особенности и является более многогранной по сравнению с традиционной логистикой коммерческих сфер деятельности. В качестве примера касательно сферы услуг можно отметить необходимость учета работы по большему количеству направлений. Действительно, к потокам продуцентов и потребителей услуг добавляются так называемые «доноры», т.к. некоммерческая сфера часто связана с несовпадением субъекта платежеспособного спроса (того, кто платит деньги) и непосредственного потребителя (клиента). Так, к типичным потребителям услуг культуры можно отнести детей, подростков, ветеранов. Работа с ними, безусловно, необходима, но, как правило, услуги они оплачивают не самостоятельно. Оплата происходит за счет родителей, бюджетных средств, заинтересованных в такой деятельности доноров, с помощью благотворительных фондов и т.д. [1].

Для сферы культуры характерно действие, как минимум, двух рынков: потребителей и доноров, при этом для эффективного управления их потоками необходимо использование логистики. Сложности проявляются в определении первичности каждого из этих рынков: происходит ли сначала определение видов работ с потребителями, а затем поиск доноров для их поддержки или подбор потребителей в соответствии с интересами доноров, готовых платить деньги за определенную работу с этими группами.

Подобные особенности, несомненно, находят отражение в положениях сервисной логистики в сфере культуры. Однако, учитывая всю их важность, следует отметить, что сервисная логистика в сфере культуры несущественно отличается от логистики услуг в широком понимании.

Несмотря на различия составляющих сферы культуры, они находят единение в специфике предоставляемых ими услуг и продукции. Не подвергается сомнению крайнее разнообразие услуг сферы культуры. По мнению отдельных авторов, они могут быть классифицированы на две группы – основные и дополнительные. Основные услуги направлены на достижение уставных целей деятельности организации культуры, т.е. способствуют реализации ее миссии. Например, в Эрмитаже к основным услугам следует отнести выставочную деятельность (представление и интерпретацию коллекций),

а также образовательную работу (в виде лекций, экскурсий, детских и юношеских студий, семинаров, конференций и т.д.).

Дополнительные услуги, наоборот, способствуют реализации второстепенных целей организации культуры и не должны вступать в противоречие с основными задачами. Достижение второстепенных целей, как правило, связано с удовлетворением потребностей клиентов в питании, информационном обеспечении, сувенирной продукции и т.п. В данном случае, к дополнительным услугам можно отнести услуги буфета, ресторана, магазина для посетителей культурного объекта, а также различные события (приемы, встречи, концерты, спектакли). К примеру, в Эрмитаже для предоставления дополнительных услуг работают кафе, книжные киоски, фотомастерские, обменные валютные пункты, почта и т. д.

Некоторые авторы приходят к мнению, что целесообразно построение классификации услуг сферы культуры на основе их деления на прямые и посреднические. К прямым услугам, в данном случае, относятся услуги, предоставляемые актерами, музыкантами и другими исполнителями, имеющими непосредственную известность и культурную значимость для потребителей. В качестве посреднических услуг рассматриваются услуги лекторов, экскурсоводов, библиотекарей, которые не обладают собственной культурной значимостью и являются лишь средством для передачи прямых услуг потребителям.

Разделение услуг сферы культуры на прямые и посреднические, несомненно, является актуальным и заслуживает внимания. Однако в приведенной классификации не учтена такая важная особенность услуги сферы культуры, как характеристики подлинности. Продукт сферы культуры, в данном случае, может быть разграничен на первичный и вторичный. В виде первичного продукта представляются материальные и нематериальные блага, предлагаемые потребителю в подлиннике (картина, скульптура, спектакль и т.п.). В качестве вторичного продукта выступают копии первичного блага, а также результаты преобразования нематериального продукта в материальный (видео- и аудиозаписи на кассетах и дисках, репродукции картин, слайды с изображениями и информацией и др.). Производство вторичного продукта имеет целью как популяризацию первичного блага, так и продвижение частного лица или организации на рынке культурных услуг и дополнительное привлечение финансовых средств [1].

В управлении процессом потребления услуг культуры необходимо применять общие принципы логистики, при этом целесообразна их конкретизация и определение особенностей для данной сферы деятельности. Выделив наиболее значимые принципы логистики, дадим им современную трактовку и покажем специфику применения в сфере потребления услуг культуры (рис. 1) [на основе 2].

Ранее (в работе [3]) были выделены особенности потребителей как потокообразующих элементов. Применительно к сфере культуры данные особенности конкретизируются (табл. 1).

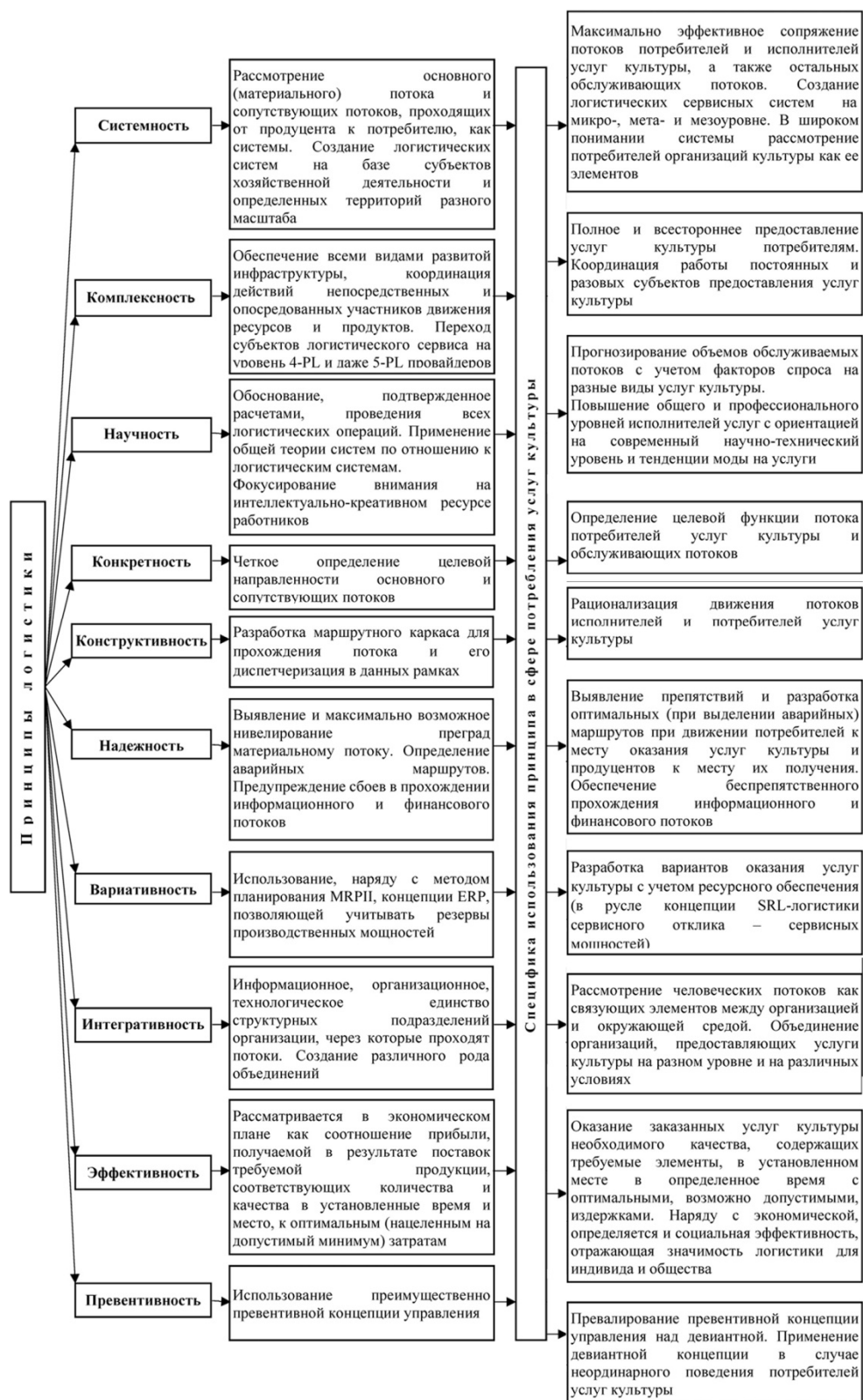


Рис. 1. Применение принципов логистики в сфере потребления услуг культуры

Конкретизация особенностей людей
как потокообразующих элементов в сфере культуры

Особенности людей как потокообразующих элементов	Конкретизация особенностей в сфере культуры
Приоритетность человеческих по сравнению с другими потоками	Несомненна
Использование форм прямого и косвенного регулирования потоков	Для прямого управления потоками следует правильно организовать движение людей, особенно при проведении массовых мероприятий (например, на стадионе); косвенное управление потоками, предполагающее выбор потребителями между аналогами или заменителями, реально как на уровне однородных учреждений культуры, так и разнородных, что связано с возможностью разнопланового проведения досуга
Совпадение объектов управления и объектов обслуживания	Положения касаются в большей степени лиц с ограниченными возможностями и пожилых людей
Непрерывность обслуживания потоков, в том числе и на пути движения людей к сервисному предприятию	
Активность человеческих потоков	В физическом плане проявляется на танцевальных вечерах, дискотеках и др. В умственном плане – это обсуждение просмотренных спектаклей (кинофильмов), прочитанных книг, увиденных картин и т.д.

В круг сервисной логистики в исследуемом контексте входят следующие задачи: обеспечение проезда потребителей услуг культуры к месту их реализации и доставка исполнителей к месту получения услуг зрителями, а также рационализация движения потребителей и исполнителей услуг внутри организации. Указанные задачи наиболее актуальны для пожилых зрителей. Уточним, что к отличительным особенностям современного периода развития относится демографическое старение, которое определяется как увеличение доли пожилых людей в общей численности населения. Так, в России в 1989 г. названная доля составляла 15,3 %, в 1995 г. – 16,6 %, в 2002 г. – 20,5 % [4], в 2008 г. – 21,1 %, в 2015 г. – 24 % [5, 6].

Отличительной особенностью сферы культуры является создание в ней как своеобразной продукции, так и оказание услуг. Например, потребители могут приобрести книгу в магазине (печатная продукция), или могут пользоваться услугами библиотек. Чтение книги, в обоих случаях, производится самостоятельно (исключением являются малолетние и болящие люди). В определенных случаях после приобретения продукции необходимо дальнейшее

самообслуживание, например, после покупки диска с записями кинофильма или концерта. В первом случае более затратным является приобретение, во втором – посещение. При этом к средствам труда следует отнести картины, книги, музыкальные инструменты. В качестве предметов труда выступает культурный уровень людей [5].

Спрос на услуги культуры определяется желанием потребителя, наличием у него свободного времени и материальной возможности оплаты культурного мероприятия. В последнее время наблюдается более прагматический подход к сфере культуры. Однако, абсолютизировать такой подход недопустимо, даже учитывая преобладание оплачиваемых услуг и увеличение их доли. Вопрос доходности индустрии культурно-развлекательных услуг является сложным для рассмотрения, поскольку в данной сфере действуют определенные социальные ограничения. К примеру, доходным можно назвать игорный бизнес, при этом его роль в обществе носит явно отрицательный подтекст.

Развитие и расширение услуг культуры резонирует с современной тенденцией возвращения общества к социальным ценностям, которые определяют миссию человека во Вселенной. Указанные ценности не препятствуют реализации человека как личности, а делают его жизнь более гармоничной. Для общества весьма значима не только экономическая, но и социальная роль культуры.

Согласно действующему законодательству РФ (закон № 3612-1 от 9 октября 1992 г. «Основы законодательства Российской Федерации о культуре» – *примечание авт.*) на финансирование сферы культуры должно выделяться 2 % расходной части федерального бюджета и не менее 6 % – бюджетов субъектов Российской Федерации и местных бюджетов. При этом в действительности финансирование культуры в РФ осуществляется в определенно меньших размерах [7]. В результате финансового кризиса в 2008 г. и последующего возникновения бюджетного дефицита, расходы консолидированного бюджета РФ на культуру и кинематографию существенно снизились и, хотя наблюдается увеличение расходов в номинальном выражении, в реальном они так или иначе уменьшаются. При этом происходит снижение удельного веса расходов на культуру как в ВВП, так и в общих издержках консолидированного бюджета РФ [8].

В связи с переходом значительной части культурных мероприятий на платную основу, незащищенные слои населения лишаются ряда соответствующих благ. Данный факт в определенной мере касается пожилых граждан, у которых возникает противоречие между наличием свободного времени и возможностью посещения мероприятий. Однако здесь следует принимать во внимание низкую мобильность пожилых людей. Сказанное в первую очередь касается индивидов, проживающих в небольших населенных пунктах. В ракурсе сервисной логистики следует сопоставить варианты доставки пожилых зрителей в киноконцертный зал крупного города или приезда исполнителей в небольшой населенный пункт.

Касательно показа кинофильмов такой проблемы не существует. Добавим, что на защите кинопроектов в министерстве культуры России поднимался вопрос о том, что для пожилых людей снимается мало фильмов и предлагалось создание фильмов на основе классики в современной интерпретации, например, «Три сестры 120 лет спустя» [9]. Возможно, специально для пожилых и не следует создавать большое количество фильмов. Просто из имеющихся фильмов следует выбирать и рекомендовать те, которые по духу соответствуют старшему поколению.

Использование логистических принципов при организации услуг культуры предполагает выделение двух логистических параметров: места и времени. Относительно места вопрос рассматривался выше. Касательно времени, целесообразно решать вопрос в сторону показа мероприятий в дневные часы, что и удобно для пожилых людей, и оставляет возможность проведения вечером представлений на коммерческой основе.

Специфика услуг культуры в том, что они оставляют возможность пролонгированного потребления, то есть обсуждения просмотренного представления. Это создает новые точки соприкосновения при общении, что особенно важно для пожилых людей.

Пожилых людей необходимо рассматривать, как и любую другую социально-возрастную группу, достаточно дифференцированную, не акцентируя при этом внимание на болезнях и необходимости получать социально-медицинскую помощь. На сегодняшний день требуется переход от медикализированной оценки старости к социологической. В данном аспекте услуги культуры играют важную роль, т.к. их действие может быть воспринято как арт-терапия,

Показатели характера спроса на потребительские услуги культуры среди молодого поколения – информация, безусловно, важная, так как дает представление об основных тенденциях потребления этих услуг среди молодежи, позволяет выделить «проблемные» сферы, пользующиеся наименьшим спросом. Обладая этой информацией, те, кто предлагают подобные виды услуг культуры и искусства, могут осуществлять стимулирующую политику спроса среди молодежи, организовывая интересные для молодого поколения акции или викторины, привлекая все большее количество посетителей, а также адекватно оценивать эффективность уже проводимых политик [на основе 10]

Целесообразно разделение потребителей услуг культуры (в частности театра и кино) в плане выделения таких конкурентных стратегий, как виоленты, пациенты, коммутанты, эксплеренты. Каждая из представленных рыночных ниш имеет не только своих продуцентов, но и потребителей. Потребители-виоленты – это массовые зрители, среди которых немалую часть составляют малоимущие граждане. Пациенты предпочитают престижные зрелищные мероприятия, к примеру, посещение дорогих театров (в Москве – Большой театр, театр Ленком). Эксплеренты – это любители неординарного искусства, в большей степени профессионалы молодого и среднего возраста, выбирающие некассовые фильмы, спектакли театров-студий. Коммутанты часто предпочитают антрепризы.

Выводы

1. В силу стремления человека приобщиться к прекрасному, подняться на более высокую ступень развития, услуги культуры всегда востребованы. Их результат связан с сознанием человека и носит невещественный характер, что определяет их социальную значимость.

2. В условиях экономического кризиса не все слои общества могут воспользоваться услугами культуры. Необходимо разработать систему льгот для малоимущих граждан касательно как цены билетов на зрелищные мероприятия, так и перемещения к месту их проведения.

3. Проблемы организации обслуживания и управления потоками потребителей услуг культуры необходимо решать с использованием положений активно развивающейся сервисной логистики, выросшей из логистического сервиса и выделившейся в отдельную логистическую ветвь. Применение здесь принципов сервисной логистики позволит предоставлять услуги культуры на качественно новом уровне.

Библиографический список

1. Тульчинский, Г. Л. Менеджмент в сфере культуры : учебное пособие / Г. Л. Тульчинский, Е. Л. Шекова ; 4-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань ; «Издательство Планета музыки», 2009. – 528 с.
2. Скоробогатова, Т. Н. Традиционная и сервисная логистика: разграничение и взаимопроникновение / Т. Н. Скоробогатова // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11, ч. 2. – С. 393–398.
3. Скоробогатова, Т. Н. Сервисная логистика в рекреационном секторе : монография / Т. Н. Скоробогатова. – Симферополь : ДИАИПИ, 2010. – 410 с.
4. Никонова, Е. А. Волонтерская деятельность пожилых людей в контексте политики активного старения на Олимпийских и Паралимпийских играх в г. Сочи / Е. А. Никонова, Е. Ю. Голубева / Олимпийское наследие: инновации, технологии, управление : материалы VII-ой Междунар. науч.-практ. конф. (28 октября – 1 ноября 2014 г.). – Сочи : РИЦ ФГБОУ ВПО «Сочинский государственный университет». – С. 174–177.
5. Скоробогатова, Т. Н. Инновационный подход к предоставлению услуг культуры для пожилых граждан / Т. Н. Скоробогатова, А. В. Шейко // *Тенденции развития современного общества: экономико-правовой аспект* : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2016. – С. 120–123.
6. Пожилое население России: проблемы и перспективы : социальный бюллетень. – Март 2016. – URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/8485.pdf> (дата обращения: 2.11.2017)
7. Финансирование сферы культуры. – URL: <http://social-culture.ru/index.php?request=full&id=149> (дата обращения: 28.09.2016).
8. Романова, В. В. Бюджетные расходы в сфере культуры и кинематографии: анализ состояния и динамики / В. В. Романова, А. В. Мацкевич / *Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики» ; Ин-т управления гос. ресурсами* ; под ред. Б. Л. Рудника. – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2014. – Вып. 2. – 72 с.
9. Жили-были старик со старухой // *Российская газета*. – № 37 (индекс 32185), № 214 (7082). – 22–28 сентября 2016 г. – С. 36.
10. Динамика изменения потребления в сфере культуры и отдыха в России – Электронный ресурс. – URL: <http://thewallmagazine.ru/change-of-consumption/> (дата обращения: 30.10.2017).

Скоробогатова Татьяна Николаевна
доктор экономических наук, профессор,
кафедра государственного
и муниципального управления,
Институт экономики и управления,
Крымский федеральный университет
имени В. И. Вернадского
E-mail: stn57@mail.ru

Skorobogatova Tatyana Nikolaevna
doctor of economic sciences, professor,
sub-department of state
and municipal management,
Institute of Economics and Management,
Crimean Federal University
named after V. I. Vernadsky

Шейко Анастасия Валентиновна
ассистент,
кафедра государственного
и муниципального управления,
Институт экономики и управления,
Крымский федеральный университет
имени В. И. Вернадского
E-mail: nastusia89@mail.ru

Sheyko Anastasia Valentinovna
assistant,
sub-department of state
and municipal management,
Institute of Economics and Management,
Crimean Federal University
named after V. I. Vernadsky

УДК 338.46:379.82

Скоробогатова, Т. Н.

Использование положений сервисной логистики при оказании услуг индустрии культуры / Т. Н. Скоробогатова, А. В. Шейко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 45–54.

**ИНДУСТРИЯ 4.0 В АПК: ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ
ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

А. А. Тусков, Е. С. Грошева, И. В. Палаткин, О. С. Шорохова

**INDUSTRY 4.0 IN THE AGRICULTURE:
THE MAIN TRENDS OF INTERNET OF THINGS
TECHNOLOGIES APPLICATION IN AGRICULTURE**

A. A. Tuskov, E. S. Grosheva, I. V. Palatkin, O. S. Shorokhova

Аннотация. *Актуальность и цели.* На современном этапе интернет вещей является одной из ключевых технологий, способных радикально изменить экономику страны и мира. Агропромышленный комплекс в виду многочисленных причин и общемировых тенденций является важнейшей сферой, где эти технологии можно и нужно внедрять. Не смотря на то, что внедрение информационных технологий в агропромышленный сектор происходило всегда довольно тяжело, новый виток технологического развития дал сильнейший толчок для использования новейших цифровых технологий в данном секторе экономики. *Материалы и методы.* Теоретической основой данной работы послужили научно-исследовательские работы российских и зарубежных авторов, посвященные теоретическим и методологическим аспектам использования технологии интернета вещей в агропромышленном комплексе, публикации по теме исследования в периодической печати и Интернете. Методологической основой являются классические общенаучные методы исследования: анализ, синтез, индукция, дедукция, обобщение и классификация, а также сравнительный и системный анализ. *Выводы.* В результате проведенного исследования были определены ключевые технологии эпохи Индустрии 4.0, дана их характеристика и роль в использовании. Сделаны выводы о том, что внедрение этих технологий благоприятно повлияет на производительность, рост выручки, занятость населения и инвестиции. В заключении приведено подробное описание различных областей использования интернета вещей в деятельности сельскохозяйственных организаций.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, агропромышленный комплекс, сельское хозяйство, интернет вещей, большие данные, точное земледелие, интенсивное сельское хозяйство.

Abstract. *Background.* The Internet of things is one of the key technologies that can radically change the economy of the country and the world at the present stage. The agro-industrial complex, in view of numerous causes and global trends, is the most important area where these technologies can and should be implemented. Despite the fact that the introduction of information technology in the agro-industrial sector has always been quite difficult, a new round of technological development has given a strong impetus to the use of the latest digital technologies in this sector of the economy. *Materials and methods.* The theoretical basis of this work was the research works of Russian and foreign authors devoted to the theoretical and methodological aspects of the using Internet of things technology in the agro-industrial complex, publications on the topic of research in the periodical press and the Internet. Methodological basis is classic general scientific research methods: analysis, syn-

thesis, induction, deduction, generalization and classification, as well as comparative and systematic analysis. *Conclusions.* As a result of the research, key technologies of the of Industry 4.0 era were identified, their characteristics and role in use were given. Conclusions are made that the introduction of these technologies will favorably affect productivity, revenue growth, employment and investment. In the conclusion the detailed description of various areas of using the Internet of things in activity of the agricultural organizations is resulted.

Key words: Industry 4.0, agro-industrial complex, agriculture, Internet of Things, Big Data, precision farming, intensive agriculture.

Введение

Степень развития индустриализации и повсеместное внедрение новых технологий бесспорно ведет к переходу мира в новую цифровую эпоху. Данный период характеризуется стремительным развитием высоких технологий, проникающих во все сферы нашей жизни. Широкое использование облачных технологий, интернета вещей (IoT), виртуальной и дополненной реальности, 3D-печати, развитие квантовых технологий, робототехники и др. технологий в результате стало движущей силой Четвертой промышленной революции, известной также под термином «Индустрия 4.0».

Если на рубеже веков ни одно фермерское хозяйство по всему миру не применяло сенсорных технологий, то к 2025 г. ожидается рост их использования до более 500 млн датчиков, а к 2050 г. – более 2 млрд смарт агро-датчиков. При этом ожидается, что за период 2017–2022 гг. совокупный среднегодовой темп роста рынка интернета вещей в АПК (agriculture IoT, AIoT) составит 16–17 %. Согласно прогнозу PwC («PricewaterhouseCoopers») минимальный экономический эффект от внедрения технологий интернета вещей в агропромышленный комплекс за счет оптимизации затрат на персонал, сокращения потерь урожая и горюче-смазочных материалов к 2025 г. может составить 469 млрд руб [1].

Если говорить о долгосрочном эффекте от внедрения IoT технологий в сельское хозяйство, то он будет в первую очередь связан со значительной экономией материалов и ресурсов, и как следствие, оптимизацией расходов сельскохозяйственных предприятий. Кроме того, новые технологии будут способствовать повышению урожайности и, как результат – увеличению выручки. Все это в перспективе будет оказывать непосредственное влияние на маржинальность и конкурентоспособность предприятий.

Согласно прогнозам развития мирового рынка продовольствия, к 2050 г. в связи с увеличением населения Земли (примерно на 2,3 млрд чел. (около 33 %) и ростом его благосостояния, будет закономерно происходить и рост потребления, причем в пользу продукции сельского хозяйства [2]. Первой страной по потенциалу увеличения пашни, необходимой для производства продовольствия, безусловно, является Российская Федерация. Таким образом, на фоне происходящих изменений и с учетом основных трендов мирового развития, поиск и внедрение новых способов, методов и технологий в агропромышленный комплекс является одной из первоочередных задач.

На государственном уровне данный вопрос активно обсуждается и прорабатывается. В рамках Национальной технологической инициативы

(НТИ) на сегодняшний день разрабатывается концепция «дорожной карты» рынка FoodNet. Рынок FoodNet представляет собой рынок производства и реализации питательных веществ и конечных видов пищевых продуктов (персонализированных и общих, на основе традиционного сырья и его заменителей), а также сопутствующих IT-решений (например, обеспечивающих сервисы по логистике и подбору индивидуального питания). Ключевыми сегментами рынка будут являться: «умное» сельское хозяйство, ускоренная селекция, новые источники сырья, доступная органика, персонализированное питание. В конечном итоге, согласно данным НТИ планируется создать такие сервисы и продукты, которые будут занимать от 5 до 15 % мирового рынка (в зависимости от сегмента) [3]. Основой развития перечисленных выше сегментов рынка FoodNet является использование технологии интернета вещей.

В рамках исполнения поручения заместителя председателя правительства РФ А. В. Дворковича от 21 октября 2016 г. в соответствии с указом президента России Владимира Путина от 21 июля 2016 г. «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства» в целях реализации «Стратегии повышения качества пищевой продукции до 2030 г.» был разработан проект дорожной карты по развитию Интернета вещей (IoT) в агропромышленном комплексе (АПК) России. Разработкой данного документа занимались эксперты Фонда развития интернет-инициатив (ФРИИ) при участии Открытого правительства, Ассоциации Интернета вещей (АИВ), Департамента информационных технологий (ДИТ) и Минсельхоза России. Согласно проекту дорожной карты к 2019 г. доля разработок отечественной компонентной базы для создания оборудования в области Интернета вещей должна составлять 14 % (сегодня это 7 %), доля предприятий АПК, использующих IoT-решения, должна достигнуть 30 %. Кроме того, к этому же сроку предполагается реализация не менее 20 пилотных проектов по внедрению IoT-технологий в АПК.

Обзор ключевых технологий Индустрии 4.0

Сегодня мы наблюдаем приход Четвертой промышленной революции, известной также под термином «Индустрия 4.0», ключевыми аспектами которой являются 9 фундаментальных технологических достижений современности. В рамках концепции Индустрии 4.0 различные датчики, оборудование, продукция в производстве и информационные системы объединятся в рамках производственной цепочки, выходящей за пределы одного предприятия. Эти взаимосвязанные комплексы, так называемые киберфизические системы, будут взаимодействовать друг с другом через Интернет на основе стандартных протоколов, а также самостоятельно собирать и анализировать данные, чтобы прогнозировать отказы, самостоятельно настраиваться и адаптироваться к изменениям внешней среды. Это в свою очередь увеличит производительность, даст толчок развитию экономики, будет способствовать промышленному росту, а также изменит требования к профессиональным навыкам персонала предприятия, что, в конечном счете, повысит уровень конкурентоспособности компаний и регионов.

Многие современные производители уже применяют на своих предприятиях отдельные технологии, которые формируют основу новой технологической революции. Их объединение в рамках единой концепции позволит преобразить производство: полностью интегрированный и оптимизированный технологический поток со значительно возросшей эффективностью всех этапов меняет отношения не только между производителями и заказчиками, но и между человеком и машинами [4].

1. Цифровое моделирование. В настоящее время 3D моделирование объектов, материалов и производственных процессов широко используется на этапе разработки нового продукта. В будущем же эта технология будет широко использоваться и в процессе производства, что позволит в реальном времени использовать актуальные данные для представления физического мира в виде виртуальной модели, включающей в себя оборудование, изделия в производстве и персонал предприятия. Таким образом, значительно сократится время настройки оборудования и увеличится качество выпускаемой продукции.

2. Большие данные. Аналитика, основанная на работе с большим объемом данных, лишь недавно внедренная в сферу промышленного производства, позволяет оптимизировать качество продукции, экономить энергию и повысить работоспособность оборудования. В контексте Индустрии 4.0 сбор и всесторонняя оценка данных, полученных из разных источников – от производственного оборудования, ERP- (Enterprise Resource Planning) и CRM-систем предприятия (Customer Relationship Management), – станет стандартным инструментом для поддержки принятия решений в реальном времени.

3. Автономные роботы. Промышленные роботы уже долгое время используются на крупных предприятиях в различных отраслях промышленности для выполнения сложных задач. Но сегодня роботы все больше становятся функционально независимыми, гибкими и исполнительными по сравнению с их предшественниками. Со временем они начнут взаимодействовать друг с другом и не только спокойно работать бок о бок с человеком, но и обучаться. В будущем такие роботы будут стоять меньше, но обладать большими возможностями, чем те, что используются на производстве сегодня.

4. Горизонтальная и вертикальная интеграция систем. Большая часть из огромного количества использующихся в настоящее время информационных систем не являются полностью интегрированными. Индустрия 4.0 требует пересмотра отношения к этим сетям. Необходима полная интеграция всех процессов деятельности (коммерческих и производственных). Для этого важно наладить тесное взаимодействие не только на различных уровнях (департаментах) внутри предприятия, но также и между различными предприятиями-партнерами по производственному циклу.

5. Промышленный Интернет вещей. Сегодня лишь часть датчиков и оборудования на производстве объединены в одну сеть. Причем это, как правило, объединение в рамках классических иерархических структур, в которых датчики, периферийные устройства и автоматические контролеры подчинены единой вертикальной системе управления производством. Но с развитием промышленного Интернета вещей, все больше устройств будут оснащаться

вычислительными мощностями и стандартными сетевыми протоколами. Таким образом, оборудование будет самостоятельно обрабатывать данные, взаимодействовать между собой на низовом уровне и лишь по необходимости обращаться к централизованной управляющей системе.

6. Информационная безопасность. Многие компании до сих пор используют закрытые, не подключенные к глобальной сети системы управления производством. С увеличением сетевого взаимодействия и использования стандартных протоколов растет и потребность в обеспечении информационной безопасности основных промышленных систем и производственных линий. В результате неотъемлемыми критериями кибербезопасности становятся защищенный доступ, надежная связь, а также тщательный контроль доступа оборудования и пользователей к сетям управления.

7. Облачные технологии. Некоторые компании в своей работе уже частично используют облачное программное обеспечение, но с развитием Индустрии 4.0 данная технология будет применяться для решения большего количества задач. Со временем качество технологии облачного хранения улучшится, время получения отклика сократится до миллисекунд, и даже работа систем управления производственными процессами в будущем будет основываться на облачных технологиях.

8. Аддитивное производство. Промышленность только начала осваивать возможности аддитивных технологий, такие, как, например, применение 3D-печати для прототипирования и производства отдельных деталей. С приходом Индустрии 4.0 методы аддитивного производства будут широко использоваться для мелкосерийного производства уникальной продукции.

9. Дополненная реальность. Системы дополненной реальности могут применяться для различных целей: например, при выборе частей на складе или для отображения инструкций по ремонту и обслуживанию техники на портативных устройствах. Такие системы только начали развиваться, но в будущем станут широко использоваться для предоставления работникам актуальной информации, помощи в принятии решений в режиме реального времени и выполнении различных задач. К примеру, можно будет получить инструкцию по замене детали в неисправной системе непосредственно в момент ее осмотра с помощью очков дополненной реальности.

В целях формирования правильного представления о том, какой вклад может внести внедрение технологий четвертой промышленной революции в различные отрасли промышленности, ведущей консалтинговой компанией Boston Consulting Group был проведен анализ деятельности ведущих мировых компаний Европы, США и Азии в рамках этой концепции. Результаты показали, что четвертая промышленная революция благоприятно повлияет на 4 показателя [5]:

– Производительность. В ближайшие 10–15 лет технологии четвертой промышленной революции будут освоены значительным числом компаний, повысив производительность компаний только в Германии на 90–150 миллиардов евро. Операционные расходы на производство, исключая стоимость сырья и материалов, снизятся примерно на 15–25 %. Полная себестоимость изделий (с учетом материалов) сократится на 5–8 %. Однако эти показатели могут меняться в зависимости от того, в какой отрасли занята компания.

– Рост выручки. Внедрение технологий четвертой промышленной революции также будет способствовать увеличению дохода. Необходимость оснащения предприятий современным оборудованием и новейшими информационными приложениями, а также повышение спроса потребителей на более широкий спектр новых товаров в будущем добавит к росту ВВП промышленно развитых стран до 1 % в год.

– Занятость населения. По данным проведенного анализа, уровень занятости населения увеличится на 6 % уже за первые 10 лет. А что касается сектора разработки механических и инженерных решений, то здесь рост спроса на персонал может достигнуть 10 %. Однако, будут востребованы специалисты с новыми профессиональными навыками. В краткосрочной перспективе тенденция к большей автоматизации вытеснит низкоквалифицированных рабочих, которые в основном выполняют несложные повторяющиеся задачи. В то же время, широкое использование программного обеспечения, различных средств связи и аналитики увеличит спрос на персонал со знаниями в области программирования и IT технологий, например, на специалистов в области мехатроники. Приспособление к изменениям в требованиях к квалификации сотрудников является одной из ключевых задач развития предприятий.

– Инвестиции. Предполагается, что адаптация производственных процессов потребует от компании инвестиций в размере 1–1,5 % ее дохода в течение десяти лет.

Таким образом, в рамках Четвертой промышленной революции ключевым аспектом становится так называемое цифровое производство. Под этим понятием подразумевается многоуровневая система, включающая в себя датчики и контроллеры, установленные на конкретных узлах и агрегатах промышленного объекта, средства передачи собираемых данных и их визуализации, мощные аналитические инструменты интерпретации получаемой информации и многие другие компоненты.

Перспективы развития интернета вещей в агропромышленном комплексе

Рассмотрим подробнее, что в себя включает интернет вещей, какие изменения ожидаются в результате внедрения данной технологии в различные отрасли агропромышленного комплекса.

Концепция «Интернета вещей», заключается в том, что материалы способны идентифицировать себя с помощью своих же меток (например, в форме штрих-кода), т.е. на любой детали содержится информация о том, где она произведена, для чего предназначена и т.д. Понятие «Интернет вещей» появилось в 2008–2009 году, когда количество подключенных к интернету устройств превысило численность населения Земли [6].

При обсуждении рынка Интернета вещей часто происходит отождествление этого технологического явления с решениями, поддерживающими межмашинное взаимодействие (machine-to-machine, M2M), такими как телеметрия или наблюдения за состоянием производственных объектов. Эти решения имеют ярко выраженную индустриальную принадлежность и пред-

ставляют собой закрытые системы, часто реализуемые на специальном оборудовании со встроенным программным обеспечением.

Все стадии развития Интернета вещей и взаимодействия между системами поддерживаются комплексным набором технологий и решений от большого количества поставщиков, входящих в экосистему рынка индустриального Интернета вещей.

Согласно результатам исследований различных консалтинговых компаний, внедрение интернета вещей в агропромышленный комплекс будет способствовать повышению эффективности производства, улучшению качества жизни населения, решению экологических проблем, таким образом, обеспечивая устойчивое развитие отрасли.

Сельскохозяйственный сектор традиционно подвержен влиянию огромного числа рисков. Существует множество факторов, начиная от неточности прогнозных данных и неправильного орошения, заканчивая применением ошибочных методов посадки и сбора урожая и низкого качества почвы. Все это, безусловно, отрицательно сказывается на общей производительности.

Использование интернета вещей в сельском хозяйстве позволяет значительно снизить подобные риски и неопределенность. С помощью современных агро-датчиков пользователи могут получать высокоточные данные в режиме реального времени с полей, на которых они установлены. На основании полученных сведений специалисты могут принимать ключевые решения, например, когда орошать, собирать урожай и т.д. Организованный подобным образом круглосуточный доступ ко всей необходимой информации сводит к минимуму многочисленные риски и позволяет сельхозпроизводителям принимать более точные решения, причем не только в процессе производства, но также при планировании [7].

Такая система управления продуктивностью посевов, основанная на использовании комплекса спутниковых и компьютерных технологий получила название концепция точного земледелия («precision agriculture» (PA), «satellite farming» или «site specific crop management» (SSCM)).

Если в 2014 г. средняя сельскохозяйственная ферма имела в своем распоряжении не более 200 000 точек данных, то по прогнозам к 2050 г. эта цифра достигнет 4 млрд точек данных [8]. Таким образом, с каждым годом «связанные фермы» будут расти максимально быстро. На этом фоне максимальная ориентация на данные и их обработку будет способствовать более точному отслеживанию и контролю необходимых параметров (свойства и качество почвы, растений, степень заражения болезнями, вредителями, состояние сельскохозяйственной техники и т.д.). В данном случае речь идет о набирающей популярность сегодня технологии больших данных («Big Data»).

Все большую роль в агропромышленном комплексе приобретает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, сельскохозяйственные дроны), которые применяются для отслеживания почвенных и погодных условий (например, датчики, они могут работать в контакте со спутниками), а также создавать подробные **3D-карты** полей. Метод 3D-моделирования особенно полезен для быстрого **обнаружения существующих неэффективных** действий на местах и немедленного принятия коррек-

тирующих мер. Постоянный мониторинг жизненного цикла сельскохозяйственных культур и выполнение контроля *чрезвычайно важно в относительно крупных фермах, где ручное наблюдение затруднено*. Ценность всемирной **агропромышленной отрасли уже превышает 32 млрд долларов**, и ожидается, что эта цифра резко возрастет в течение следующей половины десятилетия.

Еще одним важным фактором, оказывающим негативное влияние на производительность фермерских хозяйств, является отсутствие надлежащего управления водными ресурсами. Согласно исследованиям почти 60 % воды, выделяемой для сельского хозяйства, теряется впустую: из-за **перенасыщения, загрязнения и других связанных с этим проблем**. Нередки случаи повреждения сельскохозяйственных культур в результате недостаточного или излишнего полива. Данные проблемы довольно эффективно решаются с помощью OGC-сервисов данных с датчиков, осуществляющих сбор информации от операций по заполнению резервуаров с целью оптимизации графиков орошения и управления данным процессом. Полученные сведения также оцениваются вместе с данными о влажности почвы и кислотном содержании. Все это в совокупности способствует более эффективному использованию ограниченных водных ресурсов. По различным данным, использование описанных технологий позволяет экономить от 30 до 50 млрд галлонов воды в год.

Использование технологии интернета вещей в агропромышленном комплексе открыло новые возможности для развития интенсивного сельского хозяйства, характеризующегося низким севооборотом и высоким уровнем использования ресурсов. Платформа с открытым исходным кодом позволяет осуществлять оперативный сбор и мгновенный обмен данными одной среды, используемой в качестве «климатического рецепта» с целью последующего его масштабирования за счет создания подобных сред на основе полученных данных. Таким образом, фермеры получают возможность искусственно создавать условия, способствующие росту любого конкретного вида культур.

Многие современные фермерские хозяйства уже оснащены самоходными тракторами и машинами. Помимо сбора данных о земле и почве, эти высокотехнологичные тракторы могут помочь в автоматическом прополке и распылении пестицидов. Фактически, датчики в автономных сельскохозяйственных тракторах могут фактически анализировать компоненты в жидких питательных веществах и, следовательно, следить за тем, чтобы распыление проводилось в нужных количествах. Автоматизированные тракторы по-прежнему сравнительно новы, и они могут стать более мощными в обозримом будущем.

Безусловно, применение технологий интернета вещей не ограничивается использованием только в растениеводстве. Уже рассмотренные выше системы контроля качества воды, продовольствия и запасов в режиме реального времени позволяют фермерам получать точную и достоверную информацию и принимать более эффективные и оперативные решения. Например, использование интернета вещей позволяет вовремя выявлять болезни животных и оказывать им своевременную помощь.

С целью сокращения потерь урожая, вызванных различными вредителями, фермеры могут использовать специализированные датчики, которые сканируют и проверяют сельскохозяйственные поля и определяют модели роста растений, прежде чем выявлять проблемные области, зараженные вредителями.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что цифровизация агропромышленного комплекса повлечет за собой выпуск более качественной продукции. Кроме того, «Индустрия 4.0» приведет к созданию более гибких систем, участники которых будут обмениваться информацией через Интернет, что, в свою очередь, значительно увеличит эффективность труда и сократит издержки в производственных процессах.

Цифровизация – абсолютно логичный процесс, который происходит абсолютно во всех сферах экономики: и в маркетинге, и в розничной торговле, и в сервисе. Современные информационные системы и нейронные сети могут анализировать больше факторов и существенно повышать эффективность любого бизнес-процесса. Разумеется, это касается и сельского хозяйства.

Перед любым сельскохозяйственным производителем на конкурентном рынке стоят две главные задачи: максимально снизить себестоимость выпускаемой продукции и увеличить получаемую чистую выручку, при этом поддерживая качество продукции на неизменно высоком уровне. Чтобы их решить, на всех этапах процесс производства должен быть полностью управляемым и прозрачным. Например, нужно четко, поэтапно отслеживать цепочку создания стоимости на каждую единицу продукции. Для этого на сельскохозяйственном предприятии создается единое информационное пространство, где высокотехнологичное оборудование, аналитические и управленческие ИТ-системы в режиме нон-стоп обмениваются данными.

Как показало исследование, использование технологии интернета вещей способно радикально изменить управление фермерскими хозяйствами. Внедрение различного рода датчиков и сенсоров, внедрение технологии больших данных, а также применение беспилотных летательных аппаратов и самоходных тракторов и машин уже сегодня способно преобразовать традиционные фермерские хозяйства в фермы нового поколения, SMART-фермы.

Библиографический список

1. «Интернет вещей» (IoT) в России: технология будущего, доступная уже сейчас. – URL: https://www.pwc.ru/ru/publications/iot/IoT-inRussia-research_rus.pdf
2. Сценарий развития мирового рынка продовольствия до 2050 г. Международный независимый институт аграрной политики. – URL: <http://мниап.рф/en/analytics/Scenarii-razvitiya-mirovogo-prodovolstvennogo-rynka-do-2050-goda/>
3. Рынок FoodNet. Национальная технологическая инициатива. – URL: <http://www.nti2035.ru/markets/foodnet>
4. Семеновская, Е. Индустриальный интернет вещей. Перспективы российского рынка / Е. Семеновская. – URL: http://www.company.rt.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf

5. The Future of Internet of Things (IoT). – URL: <https://www.bcg.com/d/news/29january2017-future-of-internet-of-things-145537>
6. Маркеева, А. В. Интернет вещей (iot): возможности и угрозы для современных организаций / А. В. Маркеева // Общество: социология, психология, педагогика. – 2016. – № 2. – С. 42–46.
7. Индустриальный интернет вещей. Перспективы российского рынка. – URL: www.rostelecom.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf
8. Интернет вещей в сельском хозяйстве (Agriculture IoT / AIoT): мировой опыт, кейсы применения и экономический эффект от внедрения в РФ. – URL: <https://www.crn.ru/news/detail.php?ID=119899>

Тусков Андрей Анатольевич

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра экономической кибернетики,
Пензенский государственный
университет
E-mail: tuskov@gmail.com

Tuskov Andrey Anatolyevich

candidate of economic sciences,
associate professor,
sub-department of economic cybernetics,
Penza State University

Грошева Екатерина Сергеевна

инженер,
Научно-исследовательский институт
фундаментальных и прикладных
исследований,
Пензенский государственный университет
E-mail: e.yudina@outlook.com

Grosheva Ekaterina Sergeyevna

engineer,
Scientific and Research Institute
of fundamental and applied research,
Penza State University

Палаткин Иван Викторович

доктор экономических наук, профессор,
директор Пензенского казачьего
института технологий (филиал)
ФГБОУ ВПО «МГУТУ имени К.Г.
Разумовского (ПКУ)»
E-mail: penza@mgutm.ru

Palatkin Ivan Viktorovich

doctor of economic sciences, professor,
Director of Penza Cossack Institute
of Technologies (branch of Razumovsky
Moscow State University of Technology
and Management)

Шорохова Олеся Сергеевна

студентка,
Пензенский государственный университет
E-mail: lesia1997@mail.ru

Shorohova Olesya Sergeyevna

student,
Penza State University

УДК 631.1

Тусков, А. А.

Индустрия 4.0 в АПК: основные тенденции применения технологий интернета вещей в сельском хозяйстве / А. А. Тусков, Е. С. Грошева, И. В. Палаткин, О. С. Шорохова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 4–16.

РЕАЛИЗАЦИЯ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ СТАНДАРТА ISO/TS 29001-2010 В СБЫТОВОЙ СЕТИ НЕФТЯНОЙ КОМПАНИИ

Л. А. Федоськина, А. А. Байгушкин

IMPLEMENTATION OF THE SPECIFIC REQUIREMENTS OF THE ISO / TS 29001-2010 STANDARD IN THE OIL COMPANY NETWORK NETWORK

L. A. Fedoskina, A. A. Baygushkin

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение качества продукции и услуг является одним из важнейших факторов конкурентоспособности, где центральная роль отведена системе менеджмента качества, основанной на отраслевых стандартах. Они обеспечивают процесс постоянного улучшения качества при помощи реализации специфичных требований стандартов применяемой отрасли на различных этапах. Цель данного исследования – выявление специфических требований отраслевого стандарта ISO/TS 29001-2010 для реализации в сбытовой сети с нефтяной компании. *Материалы и методы.* Реализация задач была достигнута за счет использования ряда общенаучных методов, среди которых: научная абстракция, сочетание исторического и логического методов, индукции, дедукции, сравнительный метод, метод классификации, графические и табличные методы. Также были задействованы полезностный метод и метод оптимизации. *Результаты.* В работе представлена модель сбытовой сети нефтяной компании. Отражена хронология версий стандарта ISO/TS 29001-2010. Определены специфичные требования данного стандарта, применимые для сбытовой сети нефтяной компании. *Выводы.* Применение отраслевого стандарта ISO/TS 29001-2010 и реализация его специфичных требований, актуально для сбытовых сетей нефтяной компании. Данные требования применительны не только к продукции, но и ко всем участникам производственного процесса внутри ВИНК.

Ключевые слова: сбытовая сеть, отраслевой стандарт, требования стандарта, система менеджмента качества, вертикально-интегрированная нефтяная компания.

Abstract. *Background.* Improving the quality of products and services is one of the most important factors of competitiveness, where the central role is assigned to the quality management system based on industry standards. They provide a process of continuous quality improvement by implementing the specific requirements of the standards of the applied industry at various stages. The purpose of this study is to identify specific requirements of the industry standard ISO / TS 29001-2010 for implementation in the sales network with the oil company. *Materials and methods.* The implementation of the objectives was achieved through the use of a number of general scientific methods, including: scientific abstraction, a combination of historical and logical methods, induction, deduction, comparative method, method of classification, graphical and tabular methods. Also, the utility method and optimization method were used. *Results.* The model of the sales network of the oil company is presented in the work. The chronology of versions of ISO / TS 29001-2010 is reflected. Specific requirements of this standard, applicable to the sales network of

the oil company, are determined. *Conclusions.* The application of the industry standard ISO / TS 29001-2010 and the implementation of its specific requirements, is relevant for the sales networks of the oil company. These requirements are applicable not only to products, but also to all participants in the production process within the VINK.

Key words: sales network, industry standard, standard requirements, quality management system, vertically integrated oil company.

Введение

Выпуск продукции и оказание услуг на высоком и качественном уровне сегодня является одной из главных задач любой компании. Выполнение требований потребителя в области качества, а также их постоянное улучшение – основа деятельности системы менеджмента качества (СМК).

Международные стандарты ИСО 9001 содержат общие требования для реализации СМК, но они не учитывают специфичные аспекты деятельности компаний в различных отраслях. В настоящее время широкое применение находят отраслевые стандарты, основанные на международных стандартах серии ИСО 9001. Такая практика продиктована в первую очередь, растущей конкуренцией и желанием компаний создать эффективную систему менеджмента качества, для удовлетворения максимального спектра требований потребителя [1]. Отраслевые стандарты призваны решить проблемы, связанные с выполнением специфичных требований в рамках производства продукции и оказания услуг.

Отраслевые стандарты нефтегазовой отрасли

Относительно предприятий нефтяной, нефтехимической и газовой отрасли, следует отметить, что в настоящее время техническим комитетом ISO/TS 67 совместно с американским нефтяным институтом (API) разработан современный стандарт ISO/TS 29001:2010. Аналогом ISO/TS 29001 со стороны API является 8-ая версия стандарта Q1 [2]. Стандарт ISO/TS 29001:2010 содержит полный текст международного стандарта ISO 9001:2008, дополняя его специфичными требованиями для нефтяной, нефтехимической и газовой отраслей промышленности [3]. Данный стандарт уникален тем, что он имеет высокую совместимость с другими стандартами, такими как ISO 14001 «Системы экологического менеджмента – Требования и руководство по применению», а также OHSAS 18001 «Системы менеджмента безопасности и охраны здоровья. Требования» [4,5]. Высокая совместимость с данными стандартами продиктована тем фактом, что нефтегазовая и нефтехимические отрасли, это отрасли, где не только высок риск загрязнения окружающей среды, но и имеется большая опасность для человека на производстве.

На сегодняшний день, в России действует национальный стандарт ГОСТ Р ИСО/ТУ 29001:2007. Стоит отметить, что стандарты ISO/TS 29001 включает в себя устаревшие, действующие с пересмотрами, а также версии на стадии разработки. В табл. 1, представлена хронология принятия последовательных версии данного стандарта.

Таблица 1

Хронология версий стандарта ISO/TS 29001

Обозначение стандарта	Создан на основе	Статус стандарта в мире	Статус стандарта в России
ISO/TS 29001:2003	ISO 9001:2000	Устаревший	Устаревший
ISO/TS 29001:2007	ISO 9001: 2001	Устаревший	Действующий
ISO/TS 29001:2010	ISO 9001:2008	Действующий	Не принят
ISO/WD 29001	ISO 9001:2015	На стадии разработки	Не принят

Актуальность использования данного стандарта заключается в том, что в большинстве случаев нефтяные нефтехимические и газовые отрасли в России представлены вертикально-интегрированными компаниями. Они включают огромное количество дочерних компаний, которые занимаются различным родом деятельности для производства единого продукта или услуги. В таких компаниях, эффективная система менеджмента качества играет огромную роль, обеспечивая выпуск продукции, соответствующей требованиям потребителя. Грамотная, спроектированная и внедренная СМК, на основе требований данных стандартов, позволяет нефтяным и газовым компаниям получать следующие выгоды [6]:

- выполнение условий контрактов по поставкам продукции нефтяной, газовой и нефтехимической продукции и услуг, на качественном уровне;
- повышение имиджа компании в лице потенциальных клиентов и заинтересованных сторон;
- получение государственных заказов, положительные результаты тендеров и конкурсов;
- снижение затрат на незапланированные расходы, возникающие при низком качестве выпускаемой продукции, затраты на исправления несоответствий.

Обратимся непосредственно к стандарту ISO 29001:2010. Как говорилось ранее, он имеет как общие требования идентичные к ISO 9001, так и ряд специфичных требований. Специфичные требования данного стандарта регламентируют следующие группы процессов:

- процессы, связанные с разработкой продукции и услуги;
- процессы, связанные с производством;
- процессы, связанные с улучшением и развитием;
- процессы, связанные с установкой и эксплуатацией.

Практически все из обозначенных групп процессов имеют влияние на результативность УК в сбытовой сети ВИНК. В этой связи целесообразно уточнить, что в специальной литературе представлено две точки зрения на сущность сбытовой сети современной компании.

Сбытовая сеть вертикально интегрированной нефтяной компании

Т. Л. Короткова и Б. Болормаа считают, что сбытовая сеть компании представляет собой систему из совокупности участников, связанных экономическими, финансовыми, социальными, инфраструктурными взаимосвязями

и коммуникациями. Данные авторы предлагают модель системы сбыта, которая представлена на рис. 1.

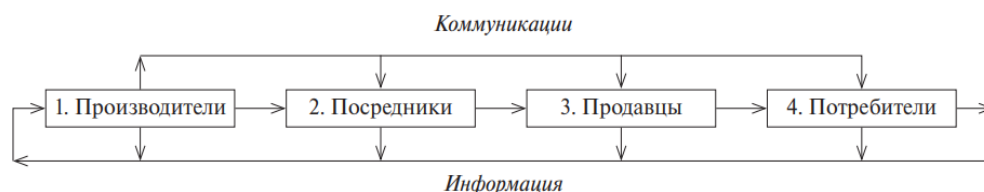


Рис. 1. Модель сбытовой сети [7]

Другую точку зрения отражают научные работы У. Стэнтон. Он определяет сбытовую сеть, как маршрут, по которому от пункта производства до пункта потребления передается право собственности на продукт или услугу [8]. Он проходит участников контракта, которые либо принимают право собственности, либо способствуют его передаче.

Исходя из рассмотренных подходов применительно к особенностям деятельности ВИНК, следует отметить, что оба они могут быть положены в основу формирования модели сбыта ВИНК.

Именно передача права собственности на продукт или услугу между основными ее участниками (производителями, посредниками, продавцами и потребителями) является центральным звеном в механизме функционирования сбытовой сети нефтяной компании. Вместе с тем, она основана на информационно-коммуникационном взаимодействии участников, основываясь на этом, можно предложить модель сбытовой сети ВИНК (рис. 2).



Рис. 2. Модель сбытовой сети ВИНК

Сбыт нефтепродуктов и услуг, исходя из представленной модели, осуществляется несколькими путями.

Во-первых, происходит реализация через собственные автозаправочные станции (АЗС), где посредником между НПЗ и АЗС может выступать нефтебазы.

Во-вторых, сбыт происходит через джобберские АЗС, где также посредниками могут выступать нефтебазы [9].

В-третьих, когда отгрузка нефтепродуктов, происходит напрямую через нефтеперерабатывающие заводы, либо нефтебазы, конечному потребителю.

Реализация специфических требований стандарта ISO/TS 29001-2010

Реализация требований стандарта ISO/TS 29001-2010 в сбытовых сетях нефтяной компании будут выглядеть следующим образом:

- для сбытовой сети, согласно пункту 4.1.1 особое значение имеет выполнения требований касательно продукции и услуг, передаваемых на аутсорсинг. Где вся ответственность, за выполнение требований ложиться на материнскую компанию. В сбытовой сети нефтяной компании, некоторый объем реализованной продукции и услуг занимают джобберские фирмы. Поэтому выполнение требований данного пункта является обязательным;

- выполнение требования пункта 6.2.2.1 дополнительное обучение персонала, является обязательным для сбытовой сети. Данный пункт стандарта ISO/TS 29001-2010, определяет порядок обучения персонала, программу обучения, частоту проверок квалификации. Реализация данного требования обеспечивает качественный подход в ходе реализации продуктов и услуг персоналом сбытовой сети;

- требование к планированию и реализации продукта заключено в пункте 7.1.1. Реализация этого требования включает в себя механизм обратной связи, когда после получение услуги и покупки, предоставляются новые требования извне. Определяются новые методы реализации и устанавливаются контрольные функции для проверки продуктов и услуг;

- реализация требования, отвечающего за контроль произведенного продукта и предоставляемой услуги, перечислены в пункте 7.5.1.1. Элементы внешней сбытовой сети должны осуществлять контроль над продукцией и оказанием услуг;

- в рамках реализации топлива или предоставлением услуги, возникает необходимость прослеживания статуса продукта. Пункт 7.5.3.3 устанавливает требования установки функций контроля для организации;

- особую значимость приобретают пункт 7.5.5.1, касающегося сохранения свойства продукции нефтехимии соответствующим требованиям потребителя;

- деятельность внешней сбытовой сети связана с контрольно-измерительными приборами. Важность их поверки, калибровки и контролем за измерительным оборудованием играет существенную роль в процессе сбыта. Требования пункта 7.6.1 раскрывают механизм контроля над измерительными приборами.

Вышеперечисленные пункты требований стандарта, имеющие отношение к сбытовой сети можно резюмировать в табл. 2.

Таблица 2

Реализация требований стандарта ISO/TS 29001-2010 в сбытовых сетях

Пункты стандарта ISO/TS 29001–2010	Требование пункта	Реализация требования для сбытовой сети	Применительны для участников
4.1.1	Аутсорсинговые процессы / или услуги	Ответственность материнской компании перед потребителем за все процессы и услуги, передаваемые на аутсорсинг джобберским компаниям	Джобберские компании, Добывающие предприятия
6.2.2.1	Обучение	Реализация программ обучения и проверки квалификации персонала участников сбытовой сети	Добывающие предприятия, Собственные АЗС, Джобберские компании, Нефтеперерабатывающий завод, Нефтебазы
7.1.1	Планирование реализации продукта	Сбор и анализ рекламаций, с целью качественного совершенствования продукта или услуги	Собственные АЗС, Джобберские компании, Нефтеперерабатывающий завод
7.5.1.1	Контроль за производством и предоставлением услуг	Контроль за соблюдением требований потребителя в процессе реализации продукции и услуги	Собственные АЗС, Джобберские компании, Нефтеперерабатывающий завод
7.5.3.3	Статус продукта	Мониторинг и отслеживание статуса продукта и услуги на разных этапах сбытовой сети	Добывающие предприятия, Собственные АЗС, Джобберские компании, Нефтеперерабатывающий завод, Нефтебазы
7.5.5.1	Сохранение продукта	Сохранение свойств продуктов нефтехимии	Собственные АЗС, Джобберские компании, Нефтеперерабатывающий завод, Нефтебазы
7.6.1	Контроль контрольно-измерительного оборудования	Поддержание в рабочем состоянии контрольно-измерительных приборов	Добывающие предприятия, Нефтеперерабатывающий завод, Нефтебазы

Заключение

Таким образом, реализация требований международного отраслевого стандарта ISO/TS 29001-2010, по мнению автора, имеет особое значение для сбытовых сетей нефтяных компании. Данные требования применительны к продукции и услугам, а также имеют отношение к персоналу, контрольно-измерительной техники, а также регулирует порядок ответственности в процессе аутсорсинга.

Библиографический список

1. Екатеринин, М. В. Анализ отраслевых стандартов на системы менеджмента качества и их применения для целей сертификации / М. В. Екатеринин // НиКа. – 2011. – № 4 – С. 12–14.
2. ISO / 29001 Система менеджмента качества на предприятиях нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности. – URL: <http://www.rusregister.ru/services/mscertification/standards/detail/index.php?ID=14703>
3. ISO / TS 29001 : 2010 Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Sector-specific quality management systems – Requirements for product and service supply organizations. – URL: <https://www.iso.org/standard/55499.html>.
4. OHSAS 18001 : 2007 «Системы менеджмента безопасности труда. Требования». – URL: <http://www.novsu.ru/file/103228>.
5. ISO 14001 : 2015 «Системы экологического менеджмента – Требования и руководство по применению». – URL: [http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-14001-2015-\(rus\).pdf](http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-14001-2015-(rus).pdf)
6. Самсонов, С. В. Особенности внедрения СМК на предприятиях нефтегазовой отрасли / С. В. Самсонов // Материалы международной научно-практической конференции в 4 частях. – 2016. – С. 18–19.
7. Короткова, Т. Л. Концептуальный подход и принципы формирования сбытовой сети при продвижении на рынок потребительских товаров / Т. Л. Короткова, Б. Болормаа // Маркетинг в России за рубежом. – 2016. – № 5. – С. 13–17.
8. Спиро, Р. Л. Управление продажами / Р. Л. Спиро, У. Дж. Стэнтон, Г. А. Рич. – М. : Гребенников. – 2007. – 704 с.
9. Кузнецова, А. И. Развитие малого предпринимательства на рынке нефтепродуктов республики Татарстан / А. И. Кузнецова, Ф. Ш. Оглы Шахбазов // Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. – 2016. – № 1 (16). – С. 58–63.

Федоськина Людмила Александровна

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра управления качеством,
Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева
E-mail: ld0168@yandex.ru

Fedoskina Ludmila Alexandrovna

candidate of economic sciences,
associate professor,
sub-department of quality management,
Mordovian State University
named after N. P. Ogarev

Байгушкин Аркадий Александрович

аспирант,
Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева
E-mail: sabaev01972@mail.ru

Baigushkin Arkady Alexandrovich

postgraduate student,
Mordovian State University
named after N. P. Ogarev

УДК

Федоськина, Л. А.

Реализация специфических требований стандарта ISO/TS 29001–2010 в сбытовой сети нефтяной компании / Л. А. Федоськина, А. А. Байгушкин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 65–71.

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, МЕХАНИЗМЫ В ТЕХНИКЕ

УДК 531.781.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЛАСТИН ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин, Е. А. Печерская, А. В. Печерский

APPLICATION OF METHODS OF SELECTIVE DRYING OF SILICON FOR ESTIMATION OF QUALITY OF PLATES AT THE MANUFACTURE MICROMECHANICAL SENSORS

F. A. Abdullin, V. E. Pautkin, E. A. Pecherskaya, A. V. Pecherskiy

Аннотация. *Актуальность и цели.* Кремний является одним из основных материалов при изготовлении современных компонентов и устройств функциональной электроники. Качество изготовления кремниевых пластин определяет параметры качества изделий. Цель исследования – установление причин растрыва кремния при анизотропном травлении и нарушения геометрии формируемых структур для повышения параметров качества технологического процесса изготовления микромеханических датчиков. *Материалы и методы.* В статье на основе использования методов селективного травления приведены результаты оценки параметров качества кремниевых пластин, используемых при изготовлении микромеханических датчиков. *Результаты.* Изложены методики выявления свирлевых дефектов и дислокаций. В основу методики определения свирлевых дефектов положено различие скорости травления областей кремниевой пластины, содержащей микродефекты по сравнению с кристаллографически совершенными областями. Методика выявления дислокаций основана на том, что на месте пересечения дислокаций и поверхности пластин скорость травления кремния выше, вследствие чего дислокации выявляются в виде ямки травления. Представлены фотографии поверхности пластин с выявленными типами дефектов. *Выводы.* Применение методов селективного травления кремния позволило экспериментально выявить два рода дефектов кремниевых пластин: свирлевые дефекты (микродефекты) и дислокации, которые имеют разные причины возникновения, описанные в статье. Представленные методики могут быть практически использованы при входном контроле качества кремниевых пластин.

Ключевые слова: кремниевые пластины, свирлевые дефекты, дислокации, селективное травление, микромеханические датчики.

Abstract. *Background.* Relevance and goals. Silicon is one of the main materials in the manufacture of modern components and devices of functional electronics. The quality of manufacturing silicon wafers determines the quality parameters of products. The purpose of the study is to establish the causes of silicon rupture during anisotropic etching and to

disrupt the geometry of the structures to improve the quality parameters of the manufacturing process for micromechanical sensors. *Materials and methods.* In the article, based on the use of selective etching methods, the results of evaluating the quality parameters of silicon-grade plates that are used in the manufacture of micromechanical sensors are presented. *Results.* Methods for revealing swirl defects and dislocations are outlined. The difference in the etching rate of the regions of a silicon wafer containing microdefects in comparison with the crystallographically perfect regions is based on the method for determining the swirl defect. The method for detecting dislocations is based on the fact that at the intersection of dislocations and the surface of the plates the etching rate of silicon is higher, as a result of which dislocations are revealed in the form of an etching pit. Images of plates with revealed types of defects are presented. *Conclusions.* The use of selective silicon etching methods made it possible to experimentally reveal two kinds of silicon wafer defects: swirl defects (microdefects) and dislocations, which have different causes of occurrence, described in the article. The presented methods can be practically used in the output control of the quality of silicon wafers.

Key words: silicon plates, swirl defects, dislocations, selective etching, micromechanical sensors.

Введение

Актуальность. Кремний является базовым материалом микроэлектроники. На его основе изготавливается огромное множество самых разнообразных устройств, позволяющих регулировать, усиливать, переключать, стабилизировать токи и напряжения, обрабатывать и хранить информацию. В датчиках кремний служит преобразователем, основное назначение которого – превращать измеряемое физическое или химического воздействие в электрический сигнал. Функции кремния в датчиках оказываются значительно более широкими, чем в обычных интегральных схемах. Это обуславливает некоторые специфические особенности технологии изготовления кремниевых чувствительных элементов. Для воспроизведения размеров и форм структур кремниевых приборов используется метод фотолитографии, обеспечивающий высокую точность изготовления.

При изготовлении современных миниатюрных полупроводниковых, в частности кремниевых микромеханических датчиков применяют не идеальный бездефектный монокристалл, а реальный кристалл, в котором присутствуют разного рода дефекты. Различные термические и механические процессы, которые используются в технологических процессах, могут как приводить к дефектам, так и менять их природу. При росте кристаллов кремния с очень низкой плотностью дислокаций возникает новый тип дефектов, которые характерны исключительно для полупроводниковых кристаллов и в настоящее время интенсивно исследуются. Из-за малого размера подобные дефекты называют микродефектами, для их наблюдения в данной статье рассмотрен метод избирательного травления. Для исследования причин, влияющих на дефекты кремниевых пластин, могут применяться методы контроля качества, например, диаграмма Исикавы, диаграмма Парето [1, 2]. Применение метода избирательного травления позволит выявлять именно те дефекты, которые приводят к отбраковке кристалла, прогнозировать их наибольший риск появления, определить их потенциальные причины и выработать корректирующие действия по их устранению.

Среди современных методов выявления дефектов в различных кремниевых структурах выделяют оптические, электронные, рентгеновские варианты микроскопии, топографии и томографии, спектроскопии. Рассматриваемый в настоящей работе метод отличается высокой чувствительностью, широкой распространенностью и простотой реализации. Широкое применение настоящего метода объясняется целым рядом причин. Как правило, плотность структурных дефектов в кремнии невелика, что позволяет надежно идентифицировать отдельные дефекты, выявленные травлением. Как известно суть этого метода заключается в получении информации о дефектном составе пластины путем визуального и микроскопического анализа особенностей рельефа его поверхности, обработанных в специальных растворах – травителях, предназначенных для выявления дислокаций (травитель Дэша, Сиртла-Адлера, Секко). В результате такой обработки формируется рельеф, состоящий из холмиков и ямок – следов от микродефектов, бывших в травленном слое пластины.

К ограничениям метода следует отнести невозможность определения детальной структуры дефекта и идентификации примесей, связанных с дефектом, а также недостаточно высокое разрешение, не позволяющее исследовать тонкую структуру кристалла. Однако чередование микроскопического исследования с травлением образца иногда позволяет получить информацию о распределении дефектов по глубине образца [3–5].

Условия экспериментальных исследований

Объект исследования – пластины из кремния марки ЭКЭС-0,01-12-ак₁ мс₁ ГОСТ 19658-81, комплектуемые для изготовления кристаллов микромеханических датчиков. Эксперимент проводился на 10 партиях пластин (в состав каждой партии входит по 5 пластин).

На 6 партиях пластин наблюдался растрав поверхности при формировании упругих элементов кристалла (анизотропное травление кремния, рис. 1). Для получения фотографий поверхности использовался инспекционный микроскоп *Nikon ECLIPSE LV100ND* и видеоизмерительный микроскоп *HIROX KH-7700*.

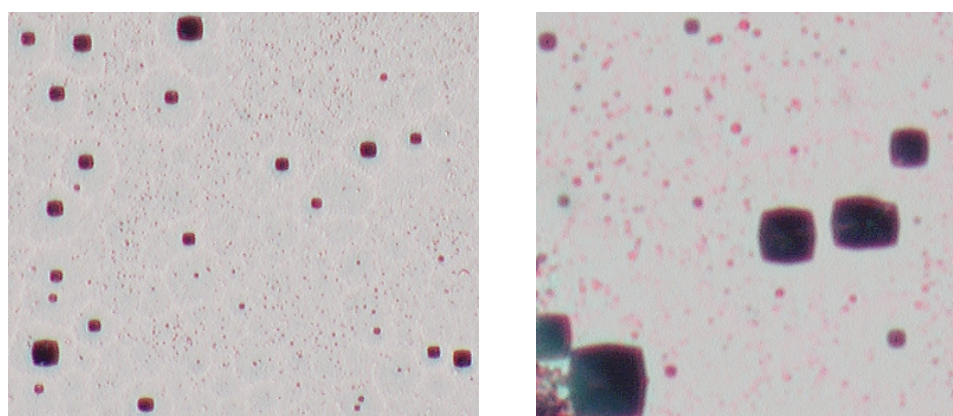


Рис. 1. Растрав поверхности упругого элемента кристалла

На трех партиях кроме нарушения поверхности кремния наблюдалось несоответствие геометрии боковых граней кристалла – отклонение от прямоугольной геометрии структур (рис. 2).



Рис. 2. Отклонение от прямоугольной геометрии структур

За период времени, в течение которого проводился эксперимент, средства технологического оснащения, технологические режимы, используемые основные и вспомогательные материалы не изменялись.

Методики выявления дефектов

Выявление свирлевых дефектов

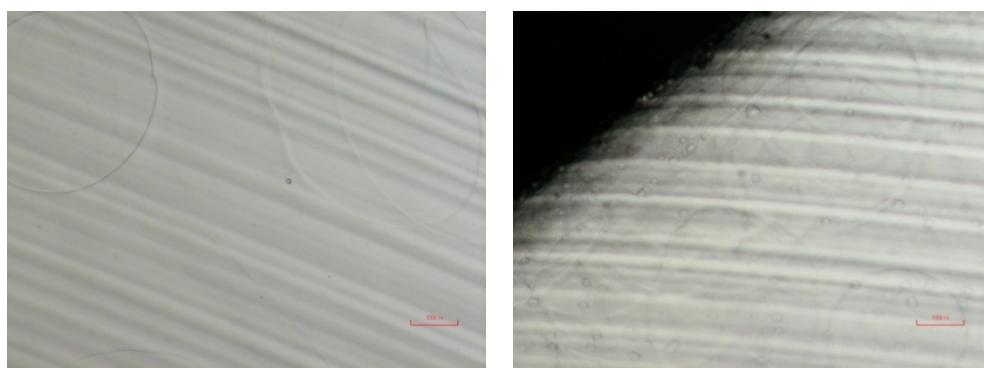
Методика определения свирлевых дефектов основана на различии скорости травления областей кремниевой пластины, содержащей микродефекты по сравнению с кристаллографически совершенными областями. В местах расположения микродефектов скорость травления изменяется, благодаря чему область микродефекта выявляется в виде плоскодонной ямки, геометрия которой определяется ориентацией исследуемой плоскости и типом микродефектов [6, 7].

Полировка пластин:

Раствор $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:3$. Продолжительность полировки 4 мин.

Для выявления свирлевых дефектов использован раствор HF : водный раствор CrO_3 (1200 г/л) = 1:4. Продолжительность травления 25 мин.

Фотографии исследуемых пластин со свирлевыми дефектами представлены на рис. 3 и 4.



а)

б)

Рис. 3. Свирль-распределение дефектов исследуемых пластин ($\times 200$)

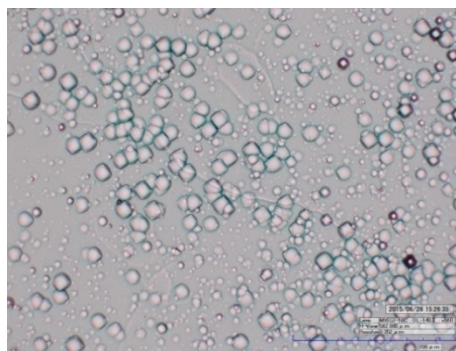


Рис. 4. Ямки травления, соответствующие микродефектам, образующим свирл-картину ($\times 800$)

Выявление дислокаций

Методика основана на различии в скорости травления областей слитка с дислокациями и без них. В месте пересечения дислокаций и поверхности пластин скорость травления кремния выше, вследствие чего дислокации выявляются в виде ямки травления [8].

Для полировки пластин использован раствор $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:3$. Продолжительность полировки составляет 4 мин.

Для выявления дислокаций использован раствор HF : водный раствор CrO_3 (300 г/л): $\text{H}_2\text{O} = 5,5:1:3,5$. Продолжительность травления – 25 мин.

Фотографии дислокационных дефектов исследуемых образцов представлены на рис. 5, а–е.

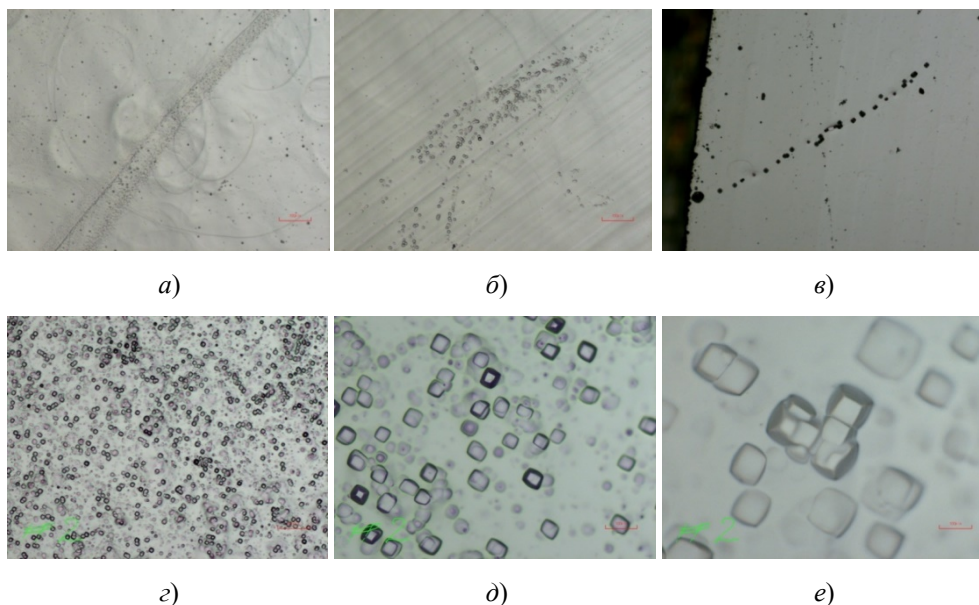


Рис. 5. Дислокационные картины травления, полученные при разном увеличении

Как видно из рис. 5, на плоскости (100) наблюдаются квадратные плоскостные ямки травления. Однако при отклонении поверхности от плоскости

(100) форма фигур травления меняется, и ямки могут принимать ромбовидные или пирамидальные очертания. Длительное травление увеличивает размеры ямок травления не влияя на их форму. Таким образом, наблюдая под микроскопом форму ямок травления, можно сделать заключение о кристаллографической ориентации исследуемых образцов.

Результаты исследований

Выводы по выявлению свирл-дефектов

Картина распределения свирлевых микродефектов в поперечном сечении пластины имеет вид замкнутой спирали, как показано на рис. 6 (отсюда и название дефектов – *swirl* (англ.) – спираль).

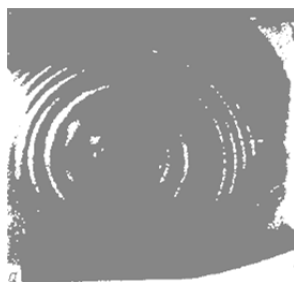


Рис. 6. Поверхность пластин кремния после избирательного травления

Такой характер распределения дефектов обусловлен ростом слитка кремния. Комплексы точечных дефектов, образующих свирл-картину, выявляются в виде плоскодонных некристаллографических ямок травления. Эти ямки имеют плоское дно и обусловлены вытравливанием локализованных дефектов. В свою очередь, характер распределения микродефектов связан с условиями роста слитка кремния [9].

Таким образом, характер растрова кремниевых пластин определяется изначальными условиями выращивания слитка. На фотографиях свирл-распределение дефектов (см. рис. 3,а,б) отчетливо видны полосы, образующие свирл-распределение дефектов. При этом у некоторых образцов полосы выходят за край пластины (рис. 3,б). Анализ распределения дефектов позволяет сделать вывод, что пластины были изготовлены из слитка большего диаметра путем механической обработки, что привносит дополнительные механические напряжения в изготавливаемые пластины. При этом напряжения распространяются по всему слитку, соответственно в каждой пластине имеют место внутренние напряжения.

Выводы по выявлению дислокаций

Дислокации – дефекты кристалла, представляющие собой линии, вдоль которых нарушена симметрия атомных плоскостей. Рис. 5 демонстрирует подобное распределение линий дислокаций по поверхности пластины. Вдоль данных линий нарушено энергетическое состояние кристаллографических плоскостей (например, внутренняя и поверхностная энергия), что приводит к несоблюдению геометрии вытравливаемых структур [6].

Заключение

Применение методов селективного травления кремния позволило экспериментально выявить два рода дефектов кремниевых пластин: свирлевые дефекты (микродефекты) и дислокации, которые имеют разные причины возникновения.

Свирлевые дефекты имеют место при росте кристаллов кремния с очень низкой плотностью дислокаций. Дислокации возникают при росте кристаллов в процессе затравливания [10]. Целесообразно выделить три основные причины возникновения дислокаций:

1) термомеханические напряжения. Одной из причин возникновения дислокаций является наличие переменных градиентов температур, существующих в кристалле во время роста. Любое отклонение от постоянного градиента температуры на фронте кристаллизации вызывает неоднородное термическое расширение, приводящее к внутренним напряжениям в затвердевающем кристалле и как следствие к образованию дислокаций. Благодаря возникновению дислокаций внутренние напряжения в кристалле уменьшаются;

2) компенсация точечных дефектов. Если в растущем кристалле концентрация собственных точечных дефектов превышает равновесную, то при охлаждении слитка, избыточные точечные дефекты (вакансии и межузельные атомы) будут объединяться, образуя агломераты. В тех случаях, когда это энергетически выгодно, происходит перестройка с образованием дислокационных петель в плотноупакованных плоскостях;

3) сегрегация примесей. Предполагается, что если кристаллы содержат примеси (либо специально вводимые, так называемые легирующие примеси, либо неконтролируемые), микроскопическая неоднородность в распределении этих примесей обуславливает локальные изменения параметра решетки кристалла, приводящее к образованию дислокаций [11, 12].

Проанализированные виды дефектов оказывают влияние на качество микромеханических датчиков, а следовательно должны быть выявлены после получения кремниевых пластин до начала их использования в дальнейших технологических операциях, чему способствуют методики, рассмотренные в данной статье.

Библиографический список

1. Печерская, Е. А. К вопросу об эффективности измерений в технологических процессах / Е. А. Печерская, Р. М. Печерская, Д. В. Рябов, О. Кузнецова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 98–99.
2. Печерская, Е. А. Применение методологии функционального и метрологического анализа к качеству исследования материалов микро- и наноэлектроники / Е. А. Печерская // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 94–98.
3. Пшеничников, Ю. П. Выявление тонкой структуры кристаллов : справочник / Ю. П. Пшеничников. – М. : Металлургия, 1974. – 528 с.
4. Юхневич, А. В. Некоторые особенности атомной структуры монокристаллов кремния / А. В. Юхневич // Избранные научные труды Белорусского государственного университета. – Минск : БГУ, 2001. – Т. 5. – С. 89–122.

5. Шифрин, С. С. «Проекционное» травление как метод исследования дефектов структуры кристаллов полупроводников / С. С. Шифрин, М. Г. Мильвидский, В. Б. Освенский // Кристаллография. – 1982. – Т. 27, № 4. – С. 712–721.
6. ГОСТ 19658-81. Кремний монокристаллический в слитках. Технические условия.
7. К. Рейви. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии : пер. с англ. – М. : Мир, 1984.
8. Технология полупроводникового кремния / Э. С. Фалькевич и др. – М. : Металлургия, 1992. – 408 с.
9. Сангвал, К. Травление кристаллов: теория, эксперимент, применение / К. Сангвал ; пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 492 с.
10. Voronkov, V. V. The mechanism of swirl defects formation in silicon / V. V. Voronkov // Journ. Cryst. Growth. – 1982. – Vol. 59, № 3. – P. 625.
11. Billing E., Proc. Roy. Soc., A 235, 37 (1956). [Имеется перевод в кн.: Кремний. – М., 1960. – С. 131–162].
12. Tiller W. A., In: The Art and Science of Growing Crystals, John Wiley and Sons, New York, 1965, Chap.15. [Имеется перевод в кн.: Теория и практика выращивания кристаллов. – М. : Металлургия, 1968. – С. 294–350].

Абдуллин Фархад Анварович

аспирант,
Пензенский государственный университет
E-mail: farhad_58@mail.ru

Abdullin Farhad Anvyarovich

post-graduate student,
Penza State University

Пауткин Валерий Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: pve1976@ya.ru

Pautkin Valery Evgenyevich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of nano
and microelectronics,
Penza State University

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolyevna

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano
and microelectronics,
Penza State University

Печерский Анатолий Вадимович

доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: ura258@yandex.ru

Pecherskiy Anatoly Vadimovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano
and microelectronics,
Penza State University,

УДК 531.781.2

Абдуллин, Ф. А.

Применение методов селективного травления кремния для оценки качества пластин при изготовлении микромеханических датчиков / Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин, Е. А. Печерская, А. В. Печерский // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 72–79.

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССУЖДЕНИЙ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПОДБОРА ПЕРСОНАЛА*****И. Ю. Балашова, Е. Н. Прошкина*****ANALYSIS AND SIMULATION OF DISCUSSIONS
IN THE INTELLECTUAL PERSONNEL SELECTION SYSTEM*****I. Yu. Balashova, E. N. Proshkina***

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разрабатываемые в последние годы системы подбора персонала предлагают широкий спектр функциональных возможностей. Однако существует ряд причин, по которым эффективность существующих систем не востребована в полной мере. В частности, перечисленные системы не позволяют обеспечить информационно-аналитическую поддержку менеджера по подбору персонала в условиях неполной и семантически нечетко формулируемой входной информации. Целью исследования является построение и анализ модели рассуждений менеджера по подбору персонала, позволяющей учесть семантически неопределенные формулировки требований к соискателю. *Материалы и методы.* Реализация задач достигнута за счет использования механизма теории нечетких множеств и нечетких запросов. Применение нечеткой логики позволяет моделировать рассуждения менеджера по подбору персонала при отборе кандидатов на вакансию. *Результаты.* Формализованы нечетко сформулированные требования к соискателю. Описано нечеткое модельное представление рассуждений менеджера по персоналу, учитывающее семантику неопределенности. Приведен пример реализации нечетких запросов в интеллектуальной системе подбора персонала. *Выводы.* Использование нечеткой логики при моделировании рассуждений менеджера по персоналу в интеллектуальной системе позволяет повысить ее конкурентоспособность на рынке информационных систем.

Ключевые слова: нечеткая логика, лингвистические переменные, интеллектуальная система подбора персонала.

Abstract. *Background.* Developed in recent years, recruitment systems offer a wide range of proposed functionalities. However, there are a number of reasons why the effectiveness of existing systems is not in full demand. So, the above systems do not allow to provide information and analytical support to the recruiting manager in conditions of incomplete and fuzzy input information. The aim of the study is to build and analyze the reasoning model of the recruiting manager, allowing to take into account the semantically vague formulations of requirements for the applicant. *Materials and methods.* The implementation of the tasks is achieved by using the mechanism of the theory of fuzzy sets and fuzzy queries. The application of fuzzy logic allows modeling the reasoning of the recruiting manager when selecting candidates for a vacancy. *Results.* Formulated unclearly formulated requirements for the applicant. A fuzzy model representation of the reasoning of the HR manager is described, which allows one to reflect the semantics of uncertainty. An example of realization of fuzzy queries in the intellectual system of personnel selection is given. *Conclusions.* The use of fuzzy logic in modeling the reasoning of the HR manager in an intellectual system makes it possible to increase its competitiveness in the information systems market.

Key words: fuzzy logic, linguistic variables, intellectual system of personnel selection.

Введение

В управлении персоналом одним из наиболее ответственных этапов является этап подбора кадров. Подбор персонала – это система мероприятий, предусмотренных организацией для привлечения сотрудников, обладающих необходимыми профессиональными навыками и другими качествами и способных выполнять на производстве возлагаемые на них должностные обязанности [1]. Качество подобранных кандидатов на вакантные должности прямым образом влияет на результат работы организации.

На российском рынке информационных технологий присутствует достаточно большой выбор программных продуктов, позволяющих автоматизировать отдельные этапы подбора кадров, например, «1С: Зарплата и Управление Персоналом 8.0», E-Staff Рекрутер, Personnel Manager, «БОСС-Кадровик» и др. [2]. Однако существует ряд причин, по которым эффективность существующих систем не востребована в полной мере. К главной причине можно отнести невозможность известными на рынке системами давать оценку соответствия потенциальным кадрам при семантически нечетко формулируемых требованиях к вакансии. Так, перечисленные системы не позволяют осуществлять эффективный подбор персонала в ситуации, когда требуемый стаж кандидата, его возраст и уровень квалификации описаны семантически неопределенно, как зачастую происходит. Использование теории нечеткой логики при моделировании рассуждений менеджера по подбору персонала и разработка механизма нечетких запросов к базе данных интеллектуальной системы позволит решить задачу управленческого решения в условиях неполной и нечеткой входной информации.

Анализ требований, предъявляемых к соискателю

Требования, предъявляемые к соискателю, зависят от вакансии и специфики деятельности предприятия. Проведена классификация наиболее часто встречающихся и наиболее значимых требований, предъявляемых работодателем к кандидату на должность. В результате осуществленного анализа выделена общая структура требований к соискателю (рис. 1).



Рис. 1. Структура требований к соискателю

Рассмотрим подробно каждое требование предлагаемой структуры.

1. Соответствие соискателя требованию 1 устанавливается на начальном этапе. К подобным требованиям может относиться ограничение по возрасту потенциального сотрудника (например, кандидат должен быть среднего возраста), или обязательное требование к семейному положению (например, кандидат должен обязательно быть женатым/замужем).

2. Установление соответствия соискателя требованию 2 определяет необходимость наличия у кандидата определенного уровня образования.

3. В большинстве случаев к стажу соискателя нет однозначных четких критериев отбора и требования сводятся к определению принадлежности значения стажа кандидата на вакансию к конкретному диапазону значений [3]. Также при формулировке данного требования часто применяют нечеткие параметры, например, «большой стаж работы».

4. Как правило, и у работодателя, и у соискателя имеется диапазон уровня заработной платы, в границах которого они готовы рассмотреть имеющиеся предложения.

5. Установление соответствия соискателя требованию 5 является наиболее сложным и значимым на протяжении всего отбора. Поскольку оценка уровня знаний, умений, навыков производится представителем работодателя, ее можно отнести к наиболее субъективной [4].

6. Определение степени владения дополнительными навыками и технологиями является достаточно сложным и длительным процессом и также характеризуется высокой степенью субъективности.

7. Устанавливается степень обладания соискателем личностными качествами, необходимыми для данной сферы деятельности.

Подбор персонала в соответствии с приведенными требованиями позволит сформировать перечень кандидатов на вакантное место.

правил нечетких продукций и алгоритма нечеткого вывода в интеллектуальной системе подбора персонала

Пусть $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ – множество требований, предъявляемых к кандидату на должность. Требуется установить рейтинг соискателя, т.е. степень соответствия характеристик соискателя предъявляемым требованиям.

В множестве T выделим требования, имеющие нечеткий характер: возраст соискателя, стаж работы, уровень владения необходимыми компетенциями в профессиональной области и др. Данным требованиям в рассматриваемой модели соответствуют лингвистические переменные

$$\langle T_i, M_i, X_i, G, P_i \rangle,$$

где T_i – наименование лингвистической переменной; M_i – терм-множество лингвистической переменной T_i , т.е. множество ее значений (термов), являющихся нечеткими переменными $\tilde{T}_i^j$, $j = \overline{1, k_i}$; X_i – область определения нечетких переменных, входящих в определение лингвистической переменной T_i ; G – процедура образования новых термов с помощью логических связок «И», «ИЛИ» и модификаторов типа «ОЧЕНЬ», «НЕ» и др.; P_i – процедура задания на множестве X_i соответствующих нечетких переменных.

Рассмотрим пример формализации нечетких требований. Обозначим через T_B лингвистическую переменную «Возраст соискателя». Официально в нашей стране работоспособным считается население в возрасте от 18 до 60 лет у мужчин и от 18 до 55 лет у женщин. Тогда область определения переменной $T_B: X_B = [18; 60]$. Выделим категории возраста и опишем их соответствующими базовыми термами:

$$M_B = \{\text{«Молодой»}, \text{«Средний»}, \text{«Старше среднего»}\}.$$

Термы лингвистической переменной «Возраст соискателя» характеризуют, исходя из их контекста, неопределенность типа «расположен в интервале». Для описания подобной неопределенности целесообразно использовать кусочно-линейные функции принадлежности, наиболее характерным примером которых является трапецевидная функция принадлежности [5]. В данном случае трапецевидные функции принадлежности термов задаются аналитически следующим выражением:

$$\mu_{\tilde{M} \in M_B}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 1 - \frac{b-x}{b-a}, & a < x \leq b; \\ 1, & b < x \leq c; \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}, & c < x \leq d; \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где a, b, c, d – некоторые числовые параметры, упорядоченные отношением: $a \leq b \leq c \leq d$. Например, функция принадлежности терма «Молодой» описывается параметрами $\langle 18, 18, 26, 30 \rangle$.

Аналогично можно формализовать другие требования, представив их соответствующими входными лингвистическими переменными. Рейтинг соискателя представляет собой выходную лингвистическую переменную R и описывается подобным образом. Тогда система нечеткого вывода будет содержать конечное множество правил нечетких продукций вида:

ПРАВИЛО $\langle k \rangle$:

$$\text{ЕСЛИ «} T_1 \text{ есть } \nabla \tilde{T}_1^j \text{» } \Theta \dots \Theta \text{ «} T_n \text{ есть } \nabla \tilde{T}_n^p \text{» ТО «} R \text{ есть } \nabla \tilde{R}_q \text{» } (\alpha_k),$$

где Θ – некоторая из бинарных операций нечеткой конъюнкции «И» или нечеткой дизъюнкции «ИЛИ»; ∇ – модификатор, определяемый процедурами G и P_i ; $\alpha_k \in [0; 1]$ – весовой коэффициент, устанавливающих степень значимости каждого правила.

При разработке схемы нечеткого вывода использован алгоритм Мамдани, который в настоящее время получил наибольшее практическое применение [6]. Численным значением входных лингвистических переменных является численное значение соответствующей характеристики соискателя. Обозначим t_i – известное количественное значение i -й входной лингвистической переменной, t'_i – результат фаззификации соответствующего подусловия правила из базы правил. Тогда результат фаззификации i -го подусловия

$$t'_i = \mu(t_i),$$

где $\mu(t_i)$ – значение функции принадлежности терма соответствующей входной лингвистической переменной.

Для нахождения степени истинности условий каждого из правил нечетких продукций применяются парные логические операции. Результат нечеткой конъюнкции определяется по формуле алгебраического произведения, нечеткой дизъюнкции – по формуле алгебраической суммы, при этом значения t'_i используются в качестве аргументов соответствующих логических операций. В результате находятся все значения t''_k для каждого k -го правила, входящего в базу правил. Те правила, степень истинности которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов.

В базе нечетких правил заключения заданы в форме элементарных нечетких лингвистических высказываний, поэтому степень истинности заключения r_k каждого из активных правил соответствующей базы будет совпадать со степенью истинности соответствующего условия $t''_k: r_k = t''_k$. После нахождения множества степеней истинности каждого заключения базы правил определяются функции принадлежности каждого из заключений для выходной лингвистической переменной с помощью min-активизации:

$$\mu'_k(r) = \min \{r_k, \mu_k(r)\},$$

где $\mu_k(r)$ – функция принадлежности терма выходной лингвистической переменной в k -м правиле; $\mu'_k(r)$ – функция принадлежности активизированного терма выходной лингвистической переменной в k -м правиле. Таким образом, для выходной лингвистической переменной определяются функции принадлежности нечетких множеств ее значений в каждом из активных правил. Результат аккумуляции для выходной лингвистической переменной определяется как объединение нечетких множеств по формуле:

$$\mu'(r) = \max_k \{\mu'_k(r)\},$$

где $\mu'(r)$ – итоговая функция принадлежности выходной лингвистической переменной. Результатом дефазификации выходной лингвистической переменной является количественное значение рейтинга соответствия соискателя вакансии r' , получаемое на основе метода центра тяжести:

$$r' = \frac{\int_0^{100} r \mu'(r) dr}{\int_0^{100} \mu'(r) dr},$$

Полученное значение рейтинга используется при формировании списка наиболее подходящих претендентов. Сортировка списка по рейтингу позволит установить лучших кандидатов на вакантную должность.

Реализация нечетких запросов в интеллектуальной системе подбора персонала

При создании систем подбора персонала одной из ключевых проблем является наличие аспекта семантической неопределенности информации, хранящейся в базе данных. Так, например, запрос «Отобразить список соискателей с большим стажем работы» невозможно сформировать при использовании стандартного подхода. Реализация механизма нечетких запросов при извлечении информации из базы данных позволяет формулировать запросы языке, близком к естественному, учесть качественные критерии и нечетко сформулированные условия [7].

Пусть некоторая информация о соискателях хранится в таблице TCandidates, имеющей следующие поля: ID – идентификатор соискателя, Experience – суммарный стаж работы по специальности и Age – его возраст (табл. 1).

Таблица 1

Сведения о кандидатах на вакансию

TCandidates		
ID	Experience	Age
1	5	29
2	10	32
3	12	34
4	1	30

Положим, из базы данных необходимо извлечь информацию о соискателях, имеющих стаж работы по специальности не менее 5 лет и возраст которых не превышает 30 лет. Запрос подобного типа будет выглядеть на языке SQL следующим образом:

SELECT * FROM TCandidates WHERE (Experience >= 5 AND Age <= 30);

При выполнении данного запроса в результирующую выборку не попадет претендент с возрастом 31 год и стажем, равным 10 годам. Однако данный вариант, скорее всего, будет являться для работодателя более приоритетным, чем 29-летний соискатель с 5-летним стажем. Для решения подобных ситуаций и применяют нечеткие запросы.

Пусть базовое терм-множество лингвистической переменной «Стаж соискателя» содержит три нечеткие переменные, функции принадлежности которых имеют вид, представленный на рис. 2.

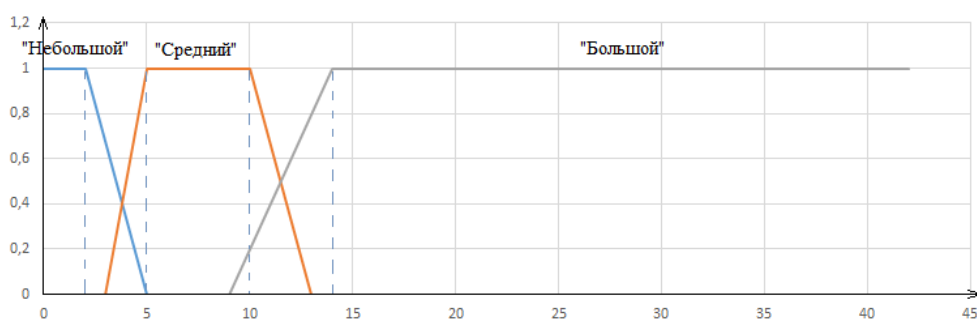


Рис. 2. Функции принадлежности термов переменной «Стаж соискателя»

Вычислим степень принадлежности сотрудника со стажем, равным 12 годам, к каждому из приведенных нечетких множеств:

$$\mu_{\text{«Небольшой»}}(12) = 0; \mu_{\text{«Средний»}}(12) = 0,33; \mu_{\text{«Большой»}}(12) = 0,5.$$

Определим функции принадлежности лингвистической переменной, описывающую возраст кандидата на вакансию (рис. 3).

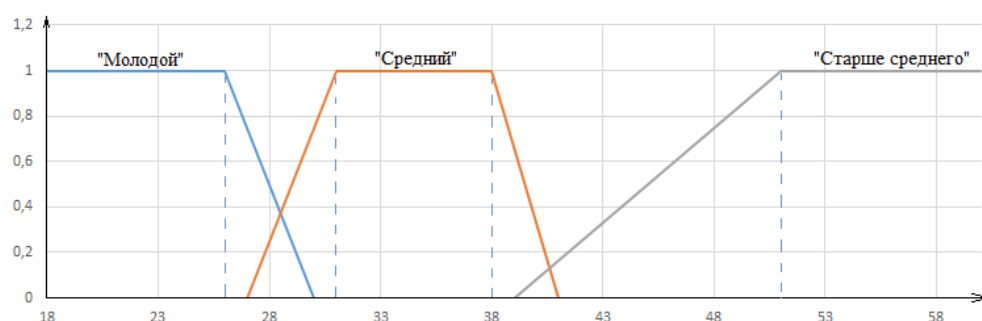


Рис. 3. Функции принадлежности термов переменной «Возраст кандидата»

Рассчитаем для таблицы TCandidates агрегированные значения функций принадлежности μ (табл. 2).

Таблица 2

Сведения о кандидатах на вакансию со значениями функций принадлежности

TCandidates								
ID	Experience	Age	$\mu(\text{Exp})_1$	$\mu(\text{Exp})_2$	$\mu(\text{Exp})_3$	$\mu(\text{Age})_1$	$\mu(\text{Age})_2$	$\mu(\text{Age})_3$
1	5	29	0	1	0	0,25	0,5	0
2	10	32	0	1	0,2	0	1	0
3	12	34	0	0,33	0,6	0	1	0
4	1	30	1	0	0	0	0,75	0

К табл. 2 можно делать нечеткие запросы. Например, запрос на получение списка всех кандидатов на вакансию среднего возраста и со средним стажем на языке SQL будет выглядеть следующим образом:

```
SELECT * FROM TCandidates WHERE (Experience =
= «Средний» AND Age = «Средний»);
```

Результат данного запроса приведен в табл. 3.

Таблица 3

Результирующая выборка для нечеткого запроса

TCandidates				
ID	Experience	Age	$\mu(\text{Exp})_2$	$\mu(\text{Age})_2$
1	5	29	1	0,5
2	10	32	1	1
3	12	34	0,33	1

Из результирующей выборки видно, что только один претендент на вакансию полностью удовлетворяет запросу (соискатель с ID = 2). Поэтому при формировании аналогичного четкого запроса два остальных значения не попали бы в выборку, хотя их характеристики почти удовлетворяют требованиям запроса.

При более детальном подходе к поиску новых сотрудников можно осуществлять поиск наиболее подходящих претендентов по каким-либо конкретным критериям с использованием нечетких модификаторов, в частности, нечеткого модификатора «ОКОЛО» (например, «Возраст кандидата на вакансию около 25 лет»). При таком варианте реализации нечетких запросов аналогично строится нечеткое множество с соответствующей функцией принадлежности, но уже на некотором относительном интервале (например, $[-10; 10]$), чтобы избежать зависимости от контекста. Затем, при вычислении функции принадлежности нечеткого множества «ОКОЛО С», где в данном случае С – некоторое целое число, осуществляется масштабирование на указанный относительный интервал.

Таким образом, применение нечетких запросов при разработке интеллектуальной системы подбора персонала позволяет осуществлять более качественный отбор кандидатов на вакансии, позволяя согласовать формальные критерии и неформальные требования к области потенциальных кандидатов или вакансий.

Заключение

Использование теории нечеткой логики позволяет моделировать рассуждения менеджера по персоналу при отборе кандидата на вакансию в условиях семантической неопределенности. Реализация механизма нечетких запросов позволит повысить конкурентоспособность интеллектуальной системы подбора персонала.

Библиографический список

1. Иванова, С. В. Искусство подбора персонала: как оценить человека за час / С. В. Иванова. – М. : Альпина Паблишер, 2015. – 272 с.
2. Аллин, О. Н. Кадры для эффективного бизнеса. Подбор и мотивация персонала / О. Н. Аллин, Н. И. Сальникова. – М. : Генезис, 2005. – 248 с.
3. Вязигин, А. В. Оценка персонала высшего и среднего звена / А. В. Вязигин. – М. : Вершина, 2006. – 256 с.
4. Баскина, Т. В. Техники успешного рекрутмента / Т. В. Баскина. – М. : Альпина Паблишер, 2014. – 288 с.
5. Белов, В. Н. Выбор функции обработки данных для оценки деятельности сотрудников вуза / В. Н. Белов, П. П. Макарычев // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 1 (69). – С. 45–50.
6. Макарычев, П. П. Нечеткая модель оценки знаний, умений, навыков в системе дистанционного обучения / П. П. Макарычев, И. Ю. Денисова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2011. – № 1-2. – С. 198–202.
7. Макарычев, П. П. Динамическая модель деятельности аспирантов в вузе / П. П. Макарычев, Н. А. Попова // Университетское образование (МКУО-2012) : сб. ст. XVI межд. науч.-метод. конф. (Пенза, 3–4 апреля 2012 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – С. 56–57.

Балашова Ирина Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математического обеспечения и
применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет
E-mail: irs-80@mail.ru

Balashova Irina Yuryevna

candidate of technical sciences, associate
professor , sub-department of software and
use of computers,
Penza State University

Прошкина Елена Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математического обеспечения и
применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет
E-mail: enp58@list.ru

Proshkina Elena Nikolayevna

candidate of technical sciences, associate
professor , sub-department of software and
use of computers,
Penza State University

УДК 004.8

Балашова, И. Ю.

Анализ и моделирование рассуждений в интеллектуальной системе подбора персонала / И. Ю. Балашова, Е. Н. Прошкина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 80–88.

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ОТВЕРСТИЙ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЯХ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Ю. А. Вашуков, Е. А. Климов

**ANALYSIS AND MODELING OF THE STRESS-DEFORMED
CONDITION OF HOLES WITH CONNECTION
IN SHEET DETAILS FROM COMPOSITE MATERIALS**

Yu. A. Vashykov, E.A. Klimov

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современный летательный аппарат (ЛА) проектируется и производится с учетом чрезвычайно жестких условий эксплуатации. Среди основных параметров эксплуатации – превышение скорости звука, многократно повторяемые пиковые нагрузки, форсированные режимы полетов во всепогодных условиях, резкие перепады температур, силовое воздействие аэродинамических факторов. Создание новых образцов авиационной и ракетно-космической техники с постоянно растущими требованиями к повышению эффективности, ресурса и надежности заставляет аэрокосмические державы разрабатывать новые материалы и технологические процессы, искать нетрадиционные конструктивные решения и методы проектирования. К числу наиболее важных требований, предъявляемых к конструкциям современных летательных аппаратов (ЛА) относятся: минимальная масса; максимальная жесткость и прочность узлов; максимальный ресурс работы конструкций в условиях эксплуатации; высокая надежность. В значительной мере перечисленные требования к конструкции обеспечиваются выбором материала и совершенствованием технологии изготовления конструкции из данного материала. Для аэрокосмической техники наиболее перспективными считаются композиционные материалы (КМ), использование которых обеспечивает максимальный рост массово совершенства конструкций ЛА. Однако эффективность использования КМ в аэрокосмической технике во многом зависит от качества соединений в зоне стыка элементов конструкции. Это связано с тем, что большинство разрушений конструкций из КМ происходит в зоне соединений (60...85 %). При этом вес стыков часто составляет 20...30 % от веса конструкции. *Материалы и методы.* Проводился анализ и сравнение существующих методов повышения несущей способности деталей из КМ с отверстиями. Рассматривался разработанный способ образования отверстий с подкреплением в деталях из КМ. Оценка напряженно-деформированного состояния деталей производилось путем конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. *Результаты.* Проверена адекватность конечно-элементной модели путем сравнения полученных результатов с известными аналитическими решениями. *Выводы.* Использование разработанного способа позволяет получить более равномерное распределение напряжений в пластине за счет введения переменного натяга. Это дает возможность управлять напряженно-деформированным состоянием в пластине из КМ по контуру отверстия при эксплуатационных нагрузках.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование, экспериментальное исследование, напряженно-деформированное состояние, подкрепление, граничные условия, растягивающая нагрузка, конечно-элементная модель, анизотропия

Abstract. Background. Modern aircraft (LA) is designed and produced taking into account harsh operating conditions. Among the main parameters of operation – sound speed excess, repeatedly repeated peak loads, forced flight modes in all-weather conditions, sudden temperature changes, force influence of aerodynamic factors. The creation of new models of aeronautical and rocket and space technology with ever-increasing demands for greater efficiency, resource and reliability makes the aerospace powers develop new materials and technological processes, look for non-traditional design solutions and design methods. Among the most important requirements for the designs of modern aircraft (LA) are: minimum mass; maximum rigidity and strength of knots; maximum service life of structures in the operating condition; high reliability. To a large extent, the listed requirements to the design are provided by the choice of material and the improvement of the technology for producing the structure of this material. Composite materials (CM) are considered to be the most promising for aerospace engineering, the use of which ensures the maximum growth of the mass perfection of aircraft designs. However, the efficiency of using composite materials in aerospace engineering largely depends on the quality of the joints in the connection area of the structural elements. This is due to the fact that most of the destruction of structures made of composite material takes place in the connection zone (60 ... 85 %). The mass of the junction zone is often 20 ... 30 % of the weight of the structure. **Materials and methods.** The analysis and comparison of existing methods of increasing the bearing capacity of composite materials parts with holes were carried out. The developed method for the formation of holes with reinforcement in the details of the composite material was considered. The stress-strain state of the parts was evaluated by finite element simulation using the ANSYS software package. **Results.** The adequacy of the finite element model is checked by comparing the results with known analytical solutions. **Conclusions.** The use of the developed method makes it possible to obtain a more even distribution of stresses in the plate due to the introduction of a variable interference. This makes it possible to control the stress-strain state in a KM plate along the hole contour under operating loads.

Key words: composite materials, modeling, experimental investigation, stress-strain state, reinforcement, boundary conditions, tensile load, finite element model, anisotropy.

Введение

Одной из сложных задач, решаемых в процессе проектирования и изготовления конструкций из композиционных материалов (КМ) является их крепление к силовым элементам и обеспечение местной прочности в местах крепления. Это объясняется тем, что при наличии силовых элементов появляются локальные сосредоточенные статически неопределимые силы и оценка напряженно-деформированного состояния материала значительно осложняется. В отличие от металлических, композиционные материалы работают, в основном, в упругой зоне деформаций, у них отсутствует пластическая податливость материала, сглаживающая концентрацию напряжений в зоне установки крепежных элементов. Проведенные в работах [1, 2, 7] исследования показали, что максимальные локальные напряжения на контуре отверстия в несколько раз превышают напряжения в регулярных зонах.

Стыки и соединения значительно увеличивают массу конструкции и в большинстве случаев являются причиной разрушения конструкций из КМ. Это приводит к необходимости применения специальных конструктивно-технологических решений при конструировании зоны соединения, связанных с повышением эффективности силовой работы. Поэтому проблема рациональной организации соединений КМ с другими элементами конструкций всегда занимает особое место в процессе создания конструкций [1].

Главными требованиями, которым должны удовлетворять соединения, являются:

- минимум массы;
- надежность (не ниже, чем у соединяемых деталей);
- возможность реализации в ограниченном объеме пространства;
- технологическая надежность или максимальное исключение влияния субъективных и объективных факторов на качество стыка;
- контролируемость качества на всех этапах изготовления и эксплуатации аппарата.

Кроме этого, в конструкциях стыков и соединений должен найти отражение ряд специальных технологических и эксплуатационных требований: разъемность, подвижность, возможность сборки на традиционном оборудовании [2, 3].

КМ обладают рядом специфических особенностей, отличающих их от металлов. К таким особенностям относятся низкие прочностные свойства на смятие, срез и межслоевой сдвиг, хрупкий характер разрушения, отсутствие пластичности и высокая абразивность. Однако механические соединения деталей из композиционных материалов осуществляются с помощью тех же крепежных элементов и теми же способами, что и из металлов, что не позволяет добиться такой же эффективности соединений, как для традиционных материалов. Поэтому при разработке конструктивно-технологических решений, способствующих повышению несущей способности соединения необходимо выполнить следующие условия: повысить прочность на смятие и срез; снизить коэффициенты концентрации напряжений возле отверстий под крепежные элементы; предотвратить преждевременное расслоение композиционного материала; исключить микроподвижность на границе контакта «композиционный материал – металл»; ограничить развития трещин и др.

Наиболее распространенными конструктивными способами повышения несущей способности деталей из КМ с отверстиями является местное усиление материала в зоне отверстий [2, 4]. Местное усиление материала получают путем утолщения материала и изменением жесткости слоев в зоне отверстий, армированием изотропной высокопрочной фольгой или релаксационной прокладкой, а также формированием высокомодульных и низкомодульных стоперов трещин.

Однако местное усиление обладает рядом недостатков [4]: невозможность применения серийного листового материала для изготовления деталей, сложная технология производства, сложность контроля качества склейки КМ с металлической лентой, наличие значительных температурных напряжений в зоне стыка при тепловой обработке и при эксплуатации в условиях повышенных температур.

Одним из самых эффективных и доступных способов повышения несущей способности композиционных материалов на смятие и срез является уменьшение диаметра крепежных элементов. Например, замена одного болта четырьмя болтами меньшего диаметра, позволяет повысить несущую способность на смятие в 2 раза, а на срез – в 4 раза [2]. Вместе с тем, увеличение количества болтов увеличивает массу и трудоемкость изготовления конструкций из композитов.

Односрезные соединения отличаются тем, что в КМ возникают значительные межслойные напряжения, вызванные реакцией детали на нагружение болта (рис. 1,а). Для восприятия этих напряжений и рассредоточения их по большей площади к КМ приклеивают или приформовывают специальные шайбы (рис. 1,б), снабженные заостренными шипами.

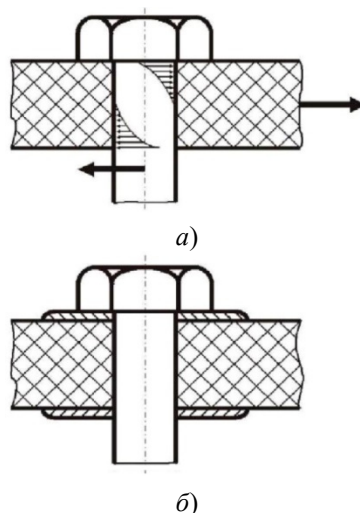


Рис. 1. Конструктивно-технологические решения по повышению прочности на смятие болтовых соединений: а – реакция детали на смятие; б – болтовое соединение с приклеенной шайбой

Вместе с тем постановка таких шайб имеет существенный недостаток. Так, при изменении температуры в клеевом слое возникают термические напряжения, которые с одной стороны детали обязательно суммируются с реакцией крепежа. Кроме того эти конструкторско-технологические решения увеличивают трудоемкость и стоимость, поэтому применяются только для ответственных соединений.

Для повышения эффективности соединений используют установку специальных болтов и гаек (рис. 2), снабженных шипами для повышения прочности их взаимодействия с КМ, рассредоточения усилий и увеличения межслойной несущей способности. Однако для применения этих конструкторско-технологических решений необходимо довести до серийного уровня технологию интегрального формования композитных деталей с такими крепежными элементами.

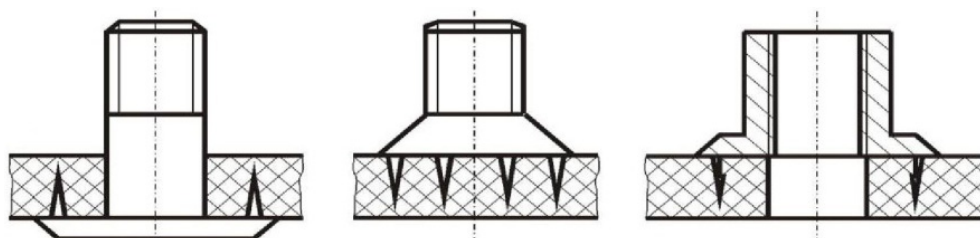


Рис. 2. Специальные крепежные элементы, приформовываемые к композитной детали

Получение отверстий под постановку болтов, как правило, осуществляют сверлением. После сверления стенка отверстия представляет собой микроворсистую поверхность из-за различного характера разрушения волокон и связующего при резании. Установка крепежного элемента в такое отверстие приводит в процессе эксплуатации к двум явлениям. Во-первых, вибрации и знакопеременные нагрузки разрушают ворс и соединение становится микроподвижным, а во-вторых, мельчайшие частицы волокон, будучи сильными абразивами, усиливают разрушение как композита, так и крепежного элемента.

Для минимизации влияния ворсистости поверхности отверстия применяют втулки (рис. 3), устанавливаемые на клеевых композициях [2]. В этом случае крепежный элемент контактирует с металлической втулкой, склеивание которой с КМ детали резко снижает ее микроподвижность, а значит и «выделение» ворса со стенок отверстия. При этом несколько увеличивается несущая способность КМ на смятие, поскольку диаметр втулки больше диаметра крепежного элемента. Кроме того металлическая втулка позволяет снизить концентрацию напряжений на границе отверстия за счет перераспределения напряжений, повысить разрушающее напряжение соединения на разрыв, обеспечить стабильность осевой затяжки болтового соединения, защитить стенки отверстия от действия агрессивных сред.

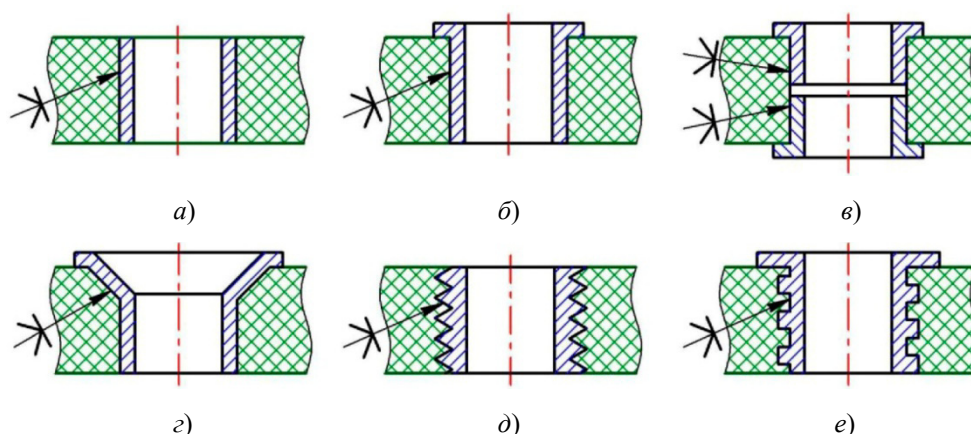


Рис. 3. Типы металлических втулок, используемых для повышения контактной прочности: а – цилиндрическая втулка; б – втулка с фланцем; в – составные втулки; г – втулка под потайное соединение; д – втулка с заостренными шипами; е – втулка с цилиндрическими шипами

В работе [6] проведены исследования влияния жесткости клея и зазора между втулкой и листовой заготовкой на уровень напряжений вокруг отверстия. Результаты, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что с увеличением жесткости клея G с 3000 до 30000 МПа окружные напряжения снижаются приблизительно на 10 % (со 110,7 до 101,6 МПа). С увеличением зазора наблюдается увеличение концентрации напряжения. Наличие клея позволяет существенно сгладить концентрацию напряжений, связанную с наличием зазора при установке втулки и приближает уровень напряженно-

деформированного состояния к уровню при установке втулки без зазора, то есть к идеальному случаю. Вместе с тем, как отмечается в работе, совместная работа подкрепляющей втулки, клеевой прослойки и стенок отверстия в листовой заготовке происходит только до определенного уровня напряжений равного 15–20 % от разрушающей нагрузки, после чего клей перестает выполнять эту функцию и напряженно-деформированное состояние изменяется. Исследования показали, что участок совместной работы втулки, клеевой прослойки и листовой заготовки не превышает 15–20 % от разрушающей нагрузки для образцов с $h/d = 1,0$ и 7–12 % для образцов с $h/d = 3,0$ (h – высота детали; d – диаметр отверстия). При дальнейшем увеличении нагрузки происходил разрыв клея между втулкой и пластиной по линии действия силы, в результате чего появлялся зазор, картина напряженно-деформированного состояния резко менялась и была близка к состоянию, полученному для пластины с обыкновенным болтовым соединением.

Разрушение клеевой прослойки происходит в результате действия на контуре отверстия в заготовке радиальных напряжений (рис. 4), возникающих в процессе действия растягивающих напряжений [9].

$$\sigma_r = \left[\kappa - \nu_{12} + N(\sin^2 \varphi + \kappa \cos^2 \varphi) \right] \frac{U_r}{Rq}, \quad (1)$$

$$k = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}, \quad N = \sqrt{2(\kappa - \nu_{12}) + \frac{E_1}{G_{12}}}, \quad q = \frac{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{E_2 + G_{12}},$$

где E_1 и E_2 – модули упругости материала листовой заготовки во взаимно-перпендикулярных направлениях; ν_{12} , ν_{21} – коэффициенты Пуассона; G_{12} – модуль сдвига; U_r – величина радиального перемещения; R – радиус отверстия в листовой заготовке.

Таблица 1

Влияние наличия зазора и жесткости клея на коэффициент концентрации напряжений (результаты численного эксперимента)

Способ установки клея	$\sigma_r^{\max}$		$\sigma_\theta^{\max}$	
	МПа	%	МПа	%
С зазором 0,23 %	173,8	106,6	169,4	168
На клее с жесткостью G , МПа				
3000	170	101,37	110,7	109,8
10 000	168,9	100,7	103,7	102,9
20 000	168,6	100,55	102,1	101,3
30 000	168,5	100,5	101,6	100,8
Без зазора	168,3	100	100,8	100

В работе С. Г. Лехницкого [9] рассматривается задача о подкреплении стенок отверстий в ортотропной пластине абсолютно жестким и упругим яд-

рами. Результаты теоретических исследований сопоставляются с результатами для аналогичной пластины со свободным отверстием. На рис. 4 показаны результаты исследований для одностороннего и двухстороннего растяжений. Из графиков видно, что при наличии жесткого ядра наибольшим является напряжение σ_r на концах диаметра, параллельного растягивающим усилиям; оно равно $\sigma_r = 1,237P$. При отсутствии ядра наибольшим является напряжение σ_θ . Оно равно $\sigma_\theta = 5,453P$ и действует на концах диаметра, перпендикулярного к направлению растягивающих усилий. В случае упругого ядра величина наибольшего тангенциального напряжения равна $\sigma_\theta = 1,684P$ и действует на концах диаметра, нормального к направлению усилий. Отмечается, что при растяжении пластины в направлении, для которого модуль упругости E_1 является наименьшим, качественная картина распределения напряжений не меняется.

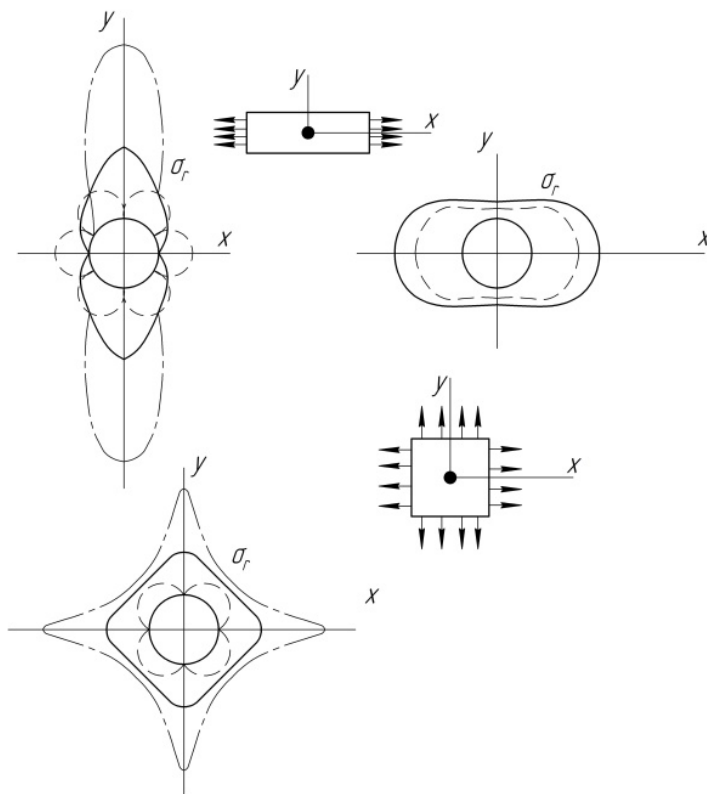


Рис. 4. Влияние подкрепляющего ядра на напряженное состояние по периметру отверстия: _____ упругое ядро; _____ жесткое ядро; ядро отсутствует

Проведенный анализ показывает, что подкрепление стенок отверстий втулками является эффективным способом повышения несущей способности механических точечных соединений. Вместе с тем, работ по исследованию технологии постановки подкрепляющих втулок в настоящее время очень мало. Предлагаемые в работах способы постановки втулки не обеспечивают

эффективность подкрепления. Это говорит о том, что для широкого промышленного использования данного способа повышения несущей способности соединений требуется разработка новых более эффективных способов постановки подкрепляющей втулки и проведение исследований в этой области.

Одним из путей увеличения этапа совместной работы соединения с подкрепляющей втулкой является уменьшение (или устранение) поля радиальных растягивающих напряжений по периметру отверстия при эксплуатационных нагрузках. Величину радиальных напряжений можно уменьшить путем предварительного (на этапе постановки втулки в отверстие) создания в зоне их действия переменного поля радиальных сжимающих напряжений.

Разработан способ [4] постановки подкрепляющего элемента в отверстие листовой заготовки из КМ. Способ постановки втулки заключается в осевом пластическом сжатии подкрепляющего элемента, в процессе осуществления которого его внутренний диаметр остается неизменным, а по внешнему диаметру осуществляется преимущественная радиальная раздача совместно с соответствующими участками листовой заготовки с образованием на границе отверстия переменного поля радиальных сжимающих напряжений (рис. 5).

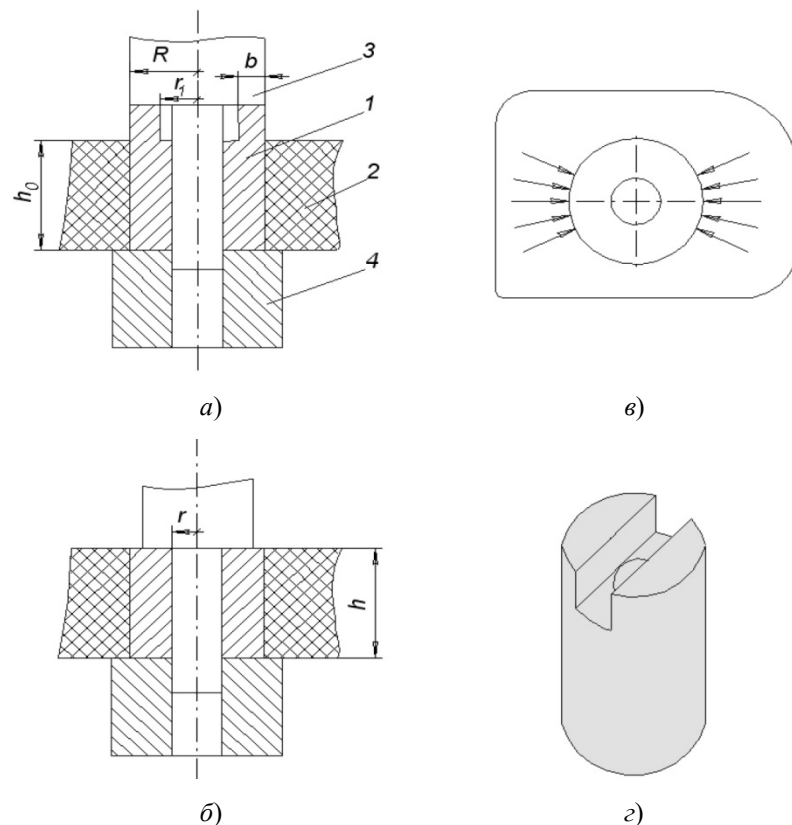


Рис. 5. Способ постановки подкрепляющего элемента: *а, б* – процесс осадки подкрепляющего элемента; *в* – поля радиальных сжимающих напряжений; *з* – подкрепляющий элемент; *1* – подкрепляющий элемент; *2* – листовая заготовка; *3* – пуансон; *4* – подпиральный элемент

Радиальные перемещение по внешнему контуру подкрепляющей втулки определяются из соотношений, полученных в работе [3]

$$U_r = \frac{1}{2} a R \left(1 - \frac{r^2}{R^2 \cos(\phi)^2} \right), \quad (1)$$

где r – внутренний радиус подкрепляющей втулки; R – внешний радиус подкрепляющей втулки.

Варьируемый параметр a определяется из выражения

$$a = \left[\frac{\sqrt{3}(E_t)^{1-n} \sigma_s (1+n) \psi_1 B_1}{\sigma_s h_0 B_2 + 0,433(E_z)^{1-n} h B_3 SLM} \right]^{1-n}, \quad (2)$$

где σ_s – предел прочности материала втулки; E_t – относительное сужение, отвечающее образованию устойчивой шейки [8]; $n = \frac{E_t}{(1+E_t)}$; h – высота листовой заготовки; h_0 – первоначальная высота подкрепляющей втулки; $E_z = (h_0 - h) / h_0$.

$$B_1 = 2,66[R^3 - (r_1)^3] - 4(r_1)^2(R - r_1) + \frac{Sh^2 B_4}{\pi \psi_1}; S = \frac{\pi[R^2 - (r_1)^2]}{2F_{сезм}}; L = E_t(1+n);$$

$$B_2 = 3[R^2 - (r_1)^2] - \frac{r^4}{[R^2 - (r_1)^2]}; B_3 = \frac{k - \nu_{12} + N(\sin(\psi)^2 + k \cos(\psi)^2)}{qt};$$

$$B_4 = \frac{\pi R}{t} - r_1 \ln \left(tg \left(\frac{\pi}{t} + \frac{\pi}{2t} \right) \right); M = \left[\left[R^2 + 2(r_1)^2 - \frac{(r_1)^4}{R^2} \right] + 2\psi_2 h \left[R - \frac{(r_1)^2}{R} \right] \right];$$

ψ_1 – эмпирический коэффициент, учитывающий состояние трущихся поверхностей и форму очага деформации, $\psi_1 = \mu_1 + \frac{1}{8} \frac{b}{h} (1 - \mu) \sqrt{\mu_1}$; μ_1 – коэффициент трения; $\psi_2 = \mu_2 + \frac{1}{8} \frac{b}{h} (1 - \mu_2) \sqrt{\mu_2}$; μ_2 – коэффициент трения в контакте между втулкой и стенкой отверстия листовой заготовки; $t = \frac{180^\circ}{\alpha}$; α – угол охвата выступа; r_1 – минимальное расстояние от центра втулки до внутренней стенки сегмента.

Таким образом, зная варьируемый параметр a из соотношения (1) можно определить зависимость деформированного состояние подкрепляющего элемента по внешнему контуру подкрепляющей втулки от ее конструктивных параметров.

Следует отметить, что величина радиальной раздачи отверстия в листовой заготовке должна быть строго ограничена и не превышать максимальной величины натяга для данного КМ. В работе [4] разработана методика опреде-

ления максимального радиального натяга для листовых заготовок из КМ на основе использования критерий прочности Дж. Марина.

Для определения напряженно-деформированного состояния изотропной пластины с подкрепленным отверстием использовались аналитические соотношения, полученные в работах [5, 10]. С учетом граничных условий (Рис.6) по контуру подкрепляющей втулки с пластиной ($r = R_1$)

$$\sigma_r = \sigma_r^1, \tau_{r\phi} = \tau_{r\phi}^1 = 0; \quad (3)$$

$$V_r = V_r^1 = \frac{pR}{\mu}(q + \varepsilon \cos \theta),$$

$$q \geq 0, \varepsilon \geq 0; \quad (4)$$

напряжения и деформации по контуру отверстия и в «полевых точках» определялись из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{p}{2} \left[\left(1 - \frac{1}{2\rho^2} \beta_{-1} \right) + \left(1 - \frac{2\alpha_{-1}}{\rho^2} - \frac{3}{2\rho^4} \beta_{-3} \right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{p}{2} \left[\left(1 + \frac{\beta_{-1}}{2\rho^2} \right) - \left(1 - \frac{3}{2\rho^4} \beta_{-3} \right) \cos 2\theta \right] \\ \tau_{r\theta} &= \frac{p}{2} \left[1 + \frac{\alpha_{-1}}{\rho^2} + \frac{3}{2\rho^4} \beta_{-3} \right] \sin 2\theta \\ V_r &= \frac{pR}{8\mu} \left\{ \left[(\chi - 1)\rho + \frac{\beta_{-1}}{\rho} \right] + \left[2\rho + (\chi + 1)\frac{\alpha_{-1}}{\rho} + \frac{1}{\rho^3} \beta_{-3} \right] \cos 2\theta \right\} \\ V_\theta &= \frac{pR}{8\mu} \left[-2\rho - (\chi - 1)\frac{\alpha_{-1}}{\rho} + \frac{1}{\rho^3} \beta_{-3} \right] \sin 2\theta \end{aligned} \quad (5)$$

где σ_r и $\sigma_r^{(1)}$ – радиальные напряжения (индекс сверху в скобках у составляющих напряжений и перемещений указывает на принадлежность к подкрепляющей втулке, эта же величина без индексов относится к заготовке); $\tau_{r\phi}$ и $\tau_{r\phi}^1$ – касательные напряжения; v_r и v_r^1 – радиальные перемещения точек контура; g и ε – малые величины порядка упругих перемещений.

При этом неизвестные параметры уравнений (5) определялись из следующих соотношений:

$$a_{-1} = \frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 [\delta_2 + n^6 \delta_3] - \varepsilon [2\delta_2 - 6\delta_4 n^4 + 2(\delta_3 + 3\delta_4) n^6] \right\}$$

$$a_1 = \frac{\pi}{D_0} (\delta_1 - 8q)$$

$$a_3 = -\frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 n^4 (n^2 - 1) \delta_2 + \varepsilon [2\delta_2 + 2n^2 (\delta_3 - \delta_4) + 2n^4 (\delta_4 - 1)] \right\}$$

$$b_{-3} = -\frac{2}{D_1} \{ \delta_1 [\delta_2 + n^4 \delta_3] \delta_2 + \epsilon [2(\delta_3 - \delta_4) + 8n^2 \delta_4 - 2n^4 (3\delta_4 + \delta_3)] \} \quad (6)$$

$$b_{-1} = \frac{2}{D_0} (\delta_1 - 8q)$$

$$\beta_{-1} = \frac{2}{D_0} [\delta_4 + \delta_2 + n^2 (\delta_3 - \delta_4) + 8(n^2 - 1)q]$$

$$b_1 = \frac{2}{D_1} \{ \delta_1 [\delta_2 (4 - 3n^2) + n^6 \delta_3] n^2 - \epsilon [8\delta_2 + 6n^2 (\delta_3 - \delta_4) + 2n^6 (\delta_3 + \delta_4)] \}$$

$$\alpha_{-1} = 2 - \frac{2}{D_1} \{ \delta_1 [\delta_2 (3n^6 - 6n^4 + 4n^2 - 1) + n^6 (n^2 - 1) \delta_3] - \epsilon [2(n^8 - 4n^4) \delta_3 + 6n^4 (\delta_3 - \delta_2) + 2(4n^2 - 1) \delta_2] \}$$

$$\beta_{-3} = -2 + \frac{2}{D_1} \{ \delta_1 [(4n^6 - 7n^4 + 4n^2 - 1) \delta_2 + n^4 (n^4 - 1) \delta_3 + \epsilon [2(n^8 - 4n^6) \delta_3 + 6n^4 (\delta_3 - \delta_2) + 2(4n^2 - 1) \delta_2]] \}$$

$$D_1 = n^2 \delta^4 [\delta_2 (3n^4 - 6n^2 + 4) + n^6 \delta_3] + (\delta_3 - \delta_1) [\delta_2 + n^2 \delta_3]$$

$$D_0 = 2\delta_2 - n^2 [\delta_2 - \delta_3]$$

$n = \frac{R}{R_1}, \rho = \frac{r}{R} - \text{безразмерный полярный радиус}$

$$\delta_1 = 1 + \chi, \delta_2 = \frac{\mu}{\mu_1} - 1, \delta_3 = 1 + \chi_1 \frac{\mu}{\mu_1}, \delta_4 = \chi + \frac{\mu}{\mu_1},$$

где $\chi = \frac{3-\nu}{1+\nu}, \chi_1 = \frac{3-\nu_1}{1+\nu_1}$; ν и ν_1 – коэффициенты Пуассона материала пластины и втулки соответственно; μ и μ_1 – модули сдвига материала пластины и втулки соответственно.

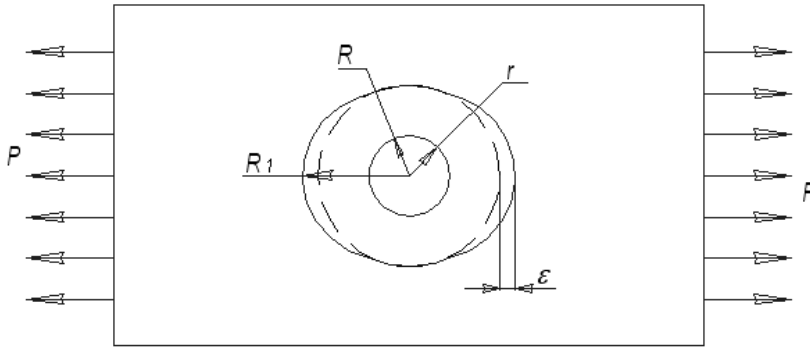


Рис. 6. Граничные условия при решении контактной задачи

Для проверки возможности конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния по контуру соединения с подкреплением пластинки из КМ была проведена проверка точности численного расчета, полученного с использованием программного продукта – Ansys Workbench (расчетный модуль – Static structural) (Рис.7), с достаточно простой моделью из этого класса, к которой применимо аналитическое решение.

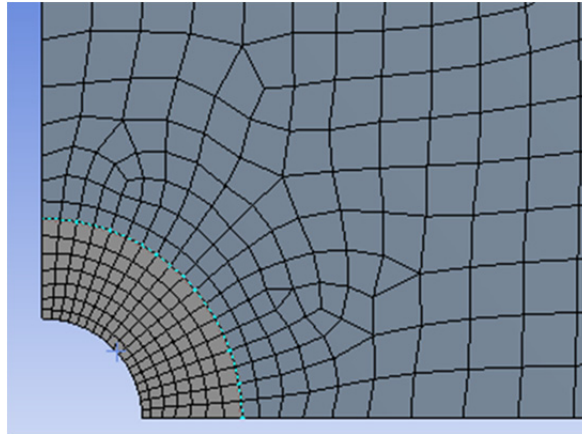


Рис. 7. Конечно-элементная модель пластинки с втулкой

В качестве упрощенной модели рассматривалась задача на одноосное растяжение изотропной пластинки с отверстием, в которое впаяно жесткое ядро (Рис.8). При этом усилие растяжения P составляло 1000 Н, что обеспечивает напряжения в пластине 30 МПа. Для аналитического определения радиальных напряжений по контуру отверстия с подкреплением использовалось [6] следующее аналитическое выражение

$$\sigma_r = p(1/1 + \nu + 2/3 - \nu \cos 2\varphi),$$

где ν – коэффициенты Пуассона изотропного материала.

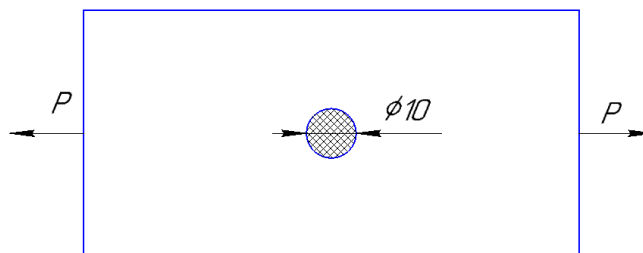


Рис. 8. Одноосное растяжение изотропной пластинки с отверстием, в которое впаяно жесткое ядро

Проведенные исследования показали, что программный продукт – Ansys Workbench (расчетный модуль – Static structural) качественно и с достаточно высокой точностью (в пределах 1–2 %) дает результат, совпадающий с рассмотренной упрощенной моделью. Увеличение погрешности чис-

ленных расчетов для углов (70...90) градусов (рис. 9) связано с выбором размера конечного элемента и, как показывает расчет, может быть уменьшено с уменьшением его размера.

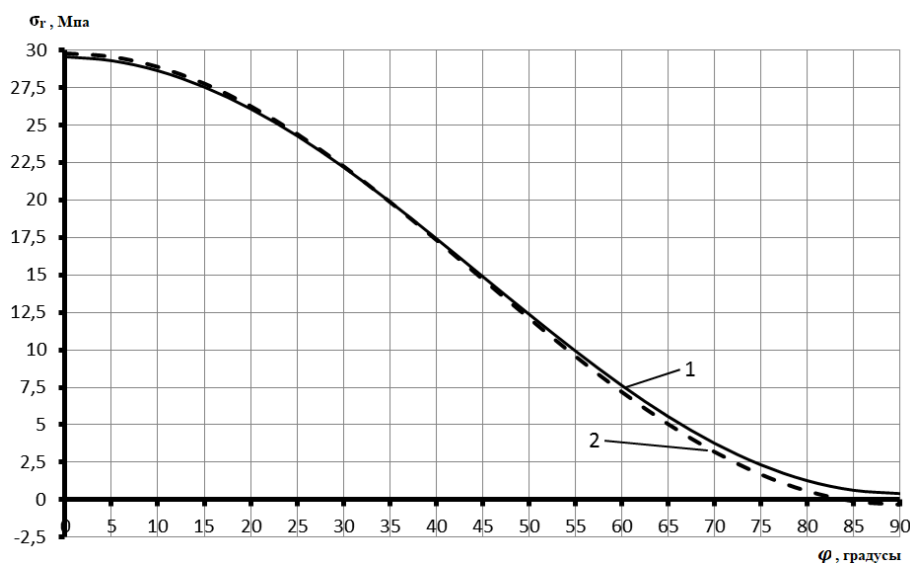


Рис. 9. Радиальных напряжений по контуру отверстия с подкреплением в изотропной пластине: 1 – аналитический расчет; 2 – конечно-элементное моделирование

Таким образом, доказана возможность применения использованного программного продукта к поставленной модели с точным осесимметричным исполнением отверстия. Это открывает возможность применения программного продукта – Ansys Workbench (расчетный модуль – Static structural) для анализа влияния погрешности не осесимметричного исполнения таких отверстий в реальных производственных технологиях на распределение напряжений в системе и, как следствие, на долговечность эксплуатации таких сборных конструкций, что позволяет в первые расчетным путем обосновать допуски на их исполнение.

В процессе исследования напряженно-деформированного состояния при одноосном растяжении пластинки рассматривались два случая:

1. Напряженно- деформированное состояние в пластинке с вклеенной втулкой от действия внешней одноосной растягивающей нагрузки $P = 1000$ Н, что обеспечивает напряжения в пластине 30 МПа;

2. Напряженно-деформированное состояние от суммы монтажных напряжений по контуру отверстия с подкреплением с напряжениями и деформациями, обусловленными преимущественной раздачей подкрепляющей втулки и внешней нагрузкой растяжения пластинки.

В процессе экспериментальных исследований использовалась изотропная пластина толщиной. При этом наружный диаметр втулки был равен 5,0 мм, внутренний диаметр 5,0мм. Материал пластинки имел следующие характеристики: $E_1 = 44\,700$ МПа, $E_2 = 44\,700$ МПа, $G_{12} = 16\,000$ МПа, $\nu_{12} = 0,35$, $\nu_{21} = 0,35$ Материал втулки – алюминиевый сплав с характери-

ками: $E = 70\,000$ МПа, $\nu = 0,3$. В процессе установки втулки в пластинку внешняя поверхность втулки покрывалась клеем, затем втулка вставлялась в отверстие пластинки и запрессовывалась. При запрессовке клей находился в жидкой фазе. Диаметр запрессованной втулки изменяется от 10 до 10,2 мм от 0 до 90 градусов и обладает формой эллипса. Результаты исследований, представленные на рис. 10 и 11, дают возможность оценить напряженное состояние по контуру отверстия с подкреплением и в «полевых» точках.

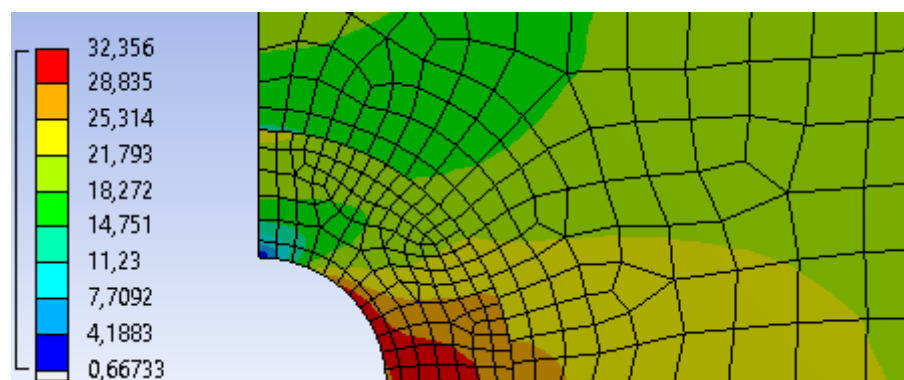


Рис. 10. Эквивалентные напряжения (по критерию Мизеса), возникающие в пластинке с клеенной втулкой от действия внешней растягивающей нагрузки

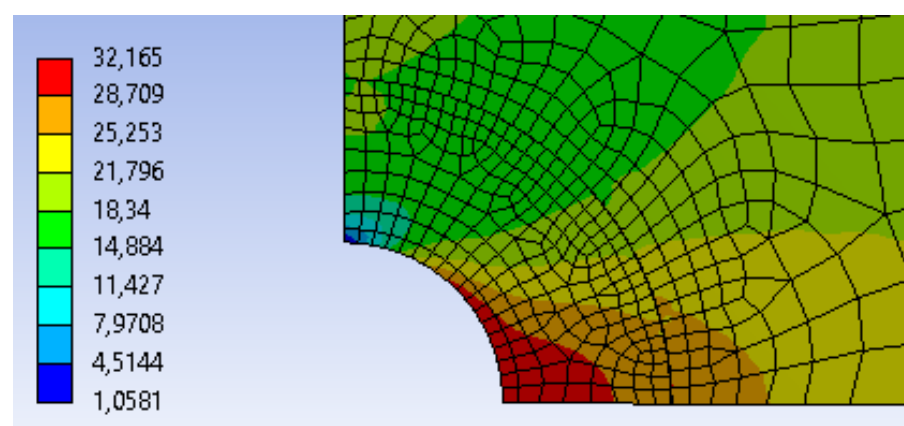


Рис. 11. Эквивалентные напряжения (по критерию Мизеса), возникающие в пластинке с клеенной и запрессованной втулкой от действия внешней растягивающей нагрузки.

На рис. 12 представлены результаты сравнения напряженного состояния на границе отверстия с подкреплением, полученным путем вклеивания и путем вклеивания с преимущественной раздачей подкрепляющего элемента.

Из приведенных графиков видно, что в случае запрессованной втулки напряжения на границе отверстия существенно выравниваются. Это позволяет в известных пределах управлять напряжениями на границе отверстия, что особенно важно для композиционных материалов с анизотропными свойствами.

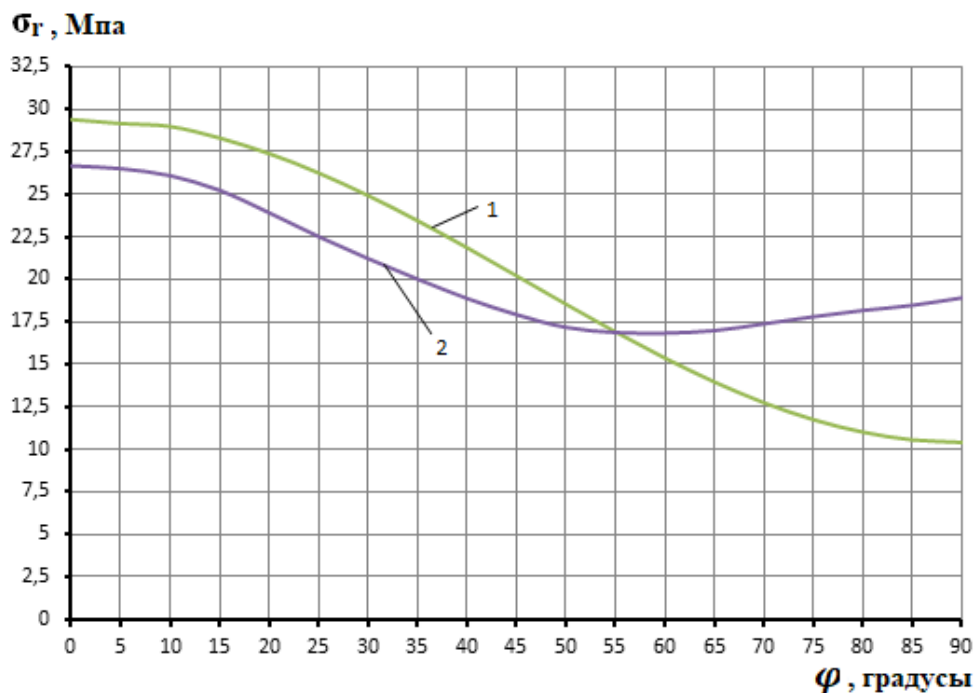


Рис. 12. Напряженное состояние на границе отверстия с подкреплением, полученным путем вклеивания (1) и путем вклеивания с преимущественной раздачей подкрепляющего элемента (2)

Проведенные исследования показали:

1. Разработанный способ постановки втулки значительно снижает напряженное состояние по периметру отверстия с подкреплением.

2. С использованием разработанного способа появилась возможность получения более равномерного распределения напряжений в пластине за счет введения переменного натяга. Это позволяет моделировать и управлять напряженно-деформируемым состоянием в пластине и подкрепляющем элементе при эксплуатационных нагрузках.

3. Разработанная конечно – элементная модель и методика расчета показала хорошее согласование результатов с известными аналитическими решениями и позволяет с высокой точностью определять напряженное состояние по контуру силовой точки в анизотропных композиционных материалах.

Библиографический список

1. Ендогур, А. И. Принципы рационального проектирования авиационных конструкций с применением композиционных материалов / А. И. Ендогур, В. А. Кравцов, В. Н. Солошенко // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – № 72.
2. Гагауз, П. М. Проектирование и конструирование изделий из композиционных материалов. Теория и практика : учебник / П. М. Гагауз, Ф. М. Гагауз, Я. С. Карпов, С. П. Кривенда ; под общ. ред. Я. С. Карпова. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиац. ин-т», 2015. – 672 с.
3. Радченко, С. Г. Математическое моделирование прочности болтовых соединений композиционных материалов типа углепластиков / С. Г. Радченко, С. Н. Лапач,

- А. З. Двейрин, Е. Т. Василевский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 63.
4. Вашуков, Ю. А. Моделирование деформированного состояния подкрепляющего элемента при его постановке в отверстие листовой детали из композиционного материала / Ю. А. Вашуков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2004. – № 2.
 5. Вашуков, Ю. А. Напряженно-деформированное состояние изотропной пластинки с подкрепленным отверстием при растяжении / Ю. А. Вашуков // Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения : материалы и доклады Международной науч.-техн. конф. – Комсомольск на Амуре, 2013. – Ч. 2. – С. 278–282.
 6. Сироткин, О. С. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники / О. С. Сироткин, В. И. Гришин, В. Б. Литвинов // Машиностроение. – 2006.
 7. Вашуков, Ю. А. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов : учеб. пособие / Ю. А. Вашуков. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 67 с.
 8. Семин, М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность / М. И. Семин, Д. В. Стреляев. – М. : МГАТУ «ЛАТМЭС», 1996. – 288 с.
 9. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – М. : Наука, 1977. – 415 с.
 10. Савин, Г. Н. Пластинки, подкрепленные составными кольцами и упругими накладками / Г. Н. Савин, В. И. Тульчий. – Киев : Наука думка, 1971. – С. 268.

Вашуков Юрий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра производства летательных
аппаратов и управления качеством
в машиностроении,
Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева
E-mail: vashukov@ssau.ru

Vashukov Yuri Alexandrovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of production
of aircraft and quality management
in mechanical engineering
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolyov

Климов Егор Андреевич

магистрант,
Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С. П. Королева
E-mail: wenzelw@yandex.ru

Klimov Yegor Andreyevich

undergraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolyov

УДК 621.961.2

Вашуков, Ю. А.

Анализ и моделирование напряженно-деформированного состояния отверстий с подкреплением в листовых деталях из композиционных материалов / Ю. А. Вашуков, Е. А. Климов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 89–104.

СИСТЕМА СЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКОЙ И МОНИТОРИНГА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ДОСМОТРОВОЙ ТЕХНИКИ

А. К. Волков

AVIATION SECURITY SCREENERS' TRAINING AND MONITORING ACTIVITIES MANAGEMENT NETWORK SYSTEM

A. K. Volkov

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях не снижающейся террористической угрозы применения взрывных устройств на объектах гражданской авиации и воздушных судах проблема повышения уровня обеспечения авиационной безопасности стоит в ряду первостепенных задач. Аспекты человеческого фактора, связанные с деятельностью операторов досмотра, имеют первостепенное значение для надежного функционирования систем досмотра в аэропортах. В связи с этим, актуальной является задача повышения эффективности подготовки и объективности оценки качества деятельности операторов досмотровой техники. Целью данного исследования является разработка предложений по применению сетевых технологий и ситуационных центров в практике обеспечения авиационной безопасности. *Материалы и методы.* Изучение международного опыта внедрения современных сетевых технологий в процесс подготовки операторов досмотровой техники и применение энтропийного моделирования для решения задач мониторинга их деятельности. *Результаты.* Предложена система сетевого управления подготовкой и мониторинга деятельности операторов досмотровой техники, состоящая из ситуационного центра авиационной безопасности с центральным сервером и базой данных. Разработано устройство сетевого контроля деятельности операторов досмотровой техники, которое позволяет осуществлять независимый контроль и их целенаправленную подготовку. Предложена энтропийная модель мониторинга деятельности операторов в виде дифференциальной энтропии многомерной случайной величины. *Выводы.* Внедрение в практику обеспечения авиационной безопасности сетевых технологий и единых ситуационных центров позволит решить такие задачи как: стандартизация подготовки и повышение объективности контроля деятельности операторов досмотра; реализация механизмов своевременного реагирования на новые угрозы, централизованного руководства, координации деятельности и организации взаимодействия между основными структурами системы авиационной безопасности.

Ключевые слова: авиационная безопасность, оператор досмотра, профессиональная подготовка, сетевые технологии, ситуационный центр, энтропия, технология регистрации движения глаз.

Abstract. *Background.* In the context of the non-decreasing terrorist threat of the use of explosive devices on civil aviation objects and aircraft, the problem of improving the level of aviation security is among the top priorities. Aspects of the human factor associated with the activities of aviation security screeners are of paramount importance for the reliable functioning of airport security systems. In this connection, the actual task is to increase

the efficiency of training and objectivity in assessing the quality of the aviation security screeners' activity. The purpose of this study is to develop proposals for the use of network technologies and situational centers in aviation security practice. *Materials and methods.* Studying of international experience of modern network technologies' introduction in the process of aviation security screeners' training and application of entropy modeling for solving tasks of monitoring their activities. *Results.* An aviation security screeners' training and monitoring activities management network system, which consist of an aviation security situational center with a central server and a database, is suggested. The device for network monitoring of the aviation security screeners' activity is developed, which allows to carry out independent control and their purposeful training. An entropy model for monitoring the aviation security screeners' activity in the form of differential entropy of a multidimensional random variable is suggested. *Conclusions.* The introduction into the practice of providing aviation security of network technologies and single situational centers will allow to solve such tasks as: standardization of training and increasing the objectivity of control of the operators' activities, implementation of mechanisms for timely response to new threats, centralized leadership, coordination of activities and organization of interaction between the main structures of the aviation security system.

Key words: aviation security, aviation security screeners, professional training, network technologies, situational center, entropy, eye tracking technology.

Введение

Увеличивающийся объем перевозимого багажа и грузов на воздушном транспорте, а одновременно и уровень потенциальных угроз, требуют применения инновационных технологий в практике обеспечения авиационной безопасности (ОАБ). Мероприятия по организации системы досмотра в аэропорту, направленные на противодействие угрозе применения взрывных устройств на воздушных судах и в аэровокзалах, является одним из важнейших элементов в общем комплексе мер ОАБ. Согласно [1] досмотр – это применение технических или других средств, предназначенных для идентификации и/или обнаружения оружия, взрывчатых веществ или других опасных устройств, которые могут быть использованы для осуществления акта незаконного вмешательства. Целью проведения досмотра является недопущения попадания в контролируемую зону или на борт воздушного судна опасных предметов и веществ. Досмотр осуществляется специальными сотрудниками службы авиационной безопасности, прошедшими необходимую профессиональную подготовку, – операторами досмотровой техники. Целью интерпретации рентгеновского изображения оператором досмотровой техники является обнаружение в багаже пассажира предметов, ограниченных к перевозке.

Аспекты человеческого фактора, связанные с деятельностью операторов досмотра, имеют первостепенное значение для надежного функционирования систем досмотра в аэропортах. Под аспектами человеческого фактора понимаются принципы, применимые к процессам создания оборудования, сертификации, профессиональной подготовки, эксплуатации и технического обслуживания и нацеленные на обеспечение оптимального взаимодействия между человеком и другими компонентами системы посредством надлежащего учета возможностей индивидуума [1].

Процесс пресечения попыток совершения проноса запрещенных предметов осуществляется операторами, использующими в своей работе определенный комплекс технических средств досмотра, таких как металлодетекторы, рентгентелевизионные интроскопы и др. Наиболее удобным средством быстрой проверки внутреннего содержимого объектов без нарушения его упаковки и причинения какого-либо ущерба являются рентгеновские установки для досмотра багажа и ручной клади.

Современная рентгеновская аппаратура обеспечивает регистрацию рентгеновского излучения в двух областях энергетического спектра (*dual energy x-ray transmission system*), что позволяет выделить в изображении контролируемого объекта органические и неорганические материалы по среднему атомному номеру [2]. На основе данной опции реализована функция автоматического выделения потенциально опасных зон на рентгеновском изображении. В определенной степени это позволило повысить эффективность обнаружения угроз. Несмотря на это, качество обнаружения в значительной степени зависит от уровня подготовленности оператора. Прежде всего, это связано с тем, что применение данной функции позволяет с большим успехом выделять зоны интереса, содержащие огнестрельное, холодное оружие, гранаты и взрывные устройства в металлических корпусах, однако надежность автоматического обнаружения пластичных взрывчатых веществ низкая. К тому же, в настоящее время данная технология имеет большой процент ложных срабатываний (порядка 30 %), что снижает доверие операторов к досмотровому оборудованию. В свою очередь, при большом количестве верных распознаваний у операторов может возникнуть ложное чувство самоуспокоенности и излишней уверенности в надежности техники [3]. В связи с этим, необходим компромиссный подход к организации взаимодействия операторов и технического средства. Уровень развития современного досмотрового оборудования также позволяет оснащать его функциями улучшения изображения (*image enhancement functions*), к ним относятся, например: увеличение изображения, изменение глубины проникновения рентгеновских лучей, раздельное представление органического/неорганического материала, изменение контрастности и др. Зарубежные исследования установили ряд проблем, касающихся применения подобных функций. В реальных производственных условиях операторы применяют только некоторые из возможных функций по улучшению изображения. Это объясняется весьма низким уровнем стандартизации, возросшим числом технических параметров (когда каждый производитель в ответ на рост конкуренции увеличивает количество возможных функций) и общим уровнем целесообразности, который все еще не определен [3].

Одним из перспективных направлений в области разработки досмотровой техники является внедрение рентгеновских методов получения многокурсовых изображений анализируемого объекта. Ввиду наличия более одного рентгеновского изображения одной и той же единицы багажа данная рентгеновская аппаратура потенциально должна повысить качество проведения процедур досмотра операторами.

В процессе совершенствования, автоматизированные досмотровые системы должны обеспечить, наряду с высоким качеством изображения, возможность автоматической адаптации к условиям контроля в зависимости от свойств объекта наблюдения и взять на себя часть функций по оценке его потенциальной опасности (автоматическое распознавание образов, база знаний, анализ томографических измерений и т.д.). Тем не менее, несмотря на постоянное повышение уровня автоматизации в рентгеновских системах, окончательное решение в отношении интерпретации изображений по-прежнему принимает оператор досмотра, работающий на рентгеновской аппаратуре. В этой связи применение самой современной рентгеновской аппаратуры не даст желаемого результата, если персонал служб досмотра надлежащим образом не подготовлен.

Таким образом, можно сделать вывод, что актуальной является задача повышения эффективности подготовки и объективности оценки качества деятельности операторов досмотровой техники.

Зарубежный опыт применения сетевых технологий в практике ОАБ

В связи с тем, что в настоящее время за рубежом в практику подготовки операторов досмотровой техники активно внедряются современные сетевые технологии и единые ситуационные центры, необходимо рассмотреть возможность адаптации зарубежного опыта в отечественную практику ОАБ.

Первоначальным этапом применения сетевых технологий в области ОАБ за рубежом явилось создание в конце 2005 единого центра контроля подготовки операторов досмотра. Для этих целей коллективом под руководством А. Шванингера (A. Schwaninger) был специально разработан компьютерный тренажер «X-Ray Tutor CBT», который в настоящее время используется более чем в 500 аэропортах по всему миру, включая Европу [4]. Представленная сетевая система, включает в себя ситуационный центр с центральным сервером «XRT Server Tools» и базой данных, объединенным единой сетью с несколькими десятками аэропортами, в которых установлены тренажеры «X-Ray Tutor CBT» [4]. Данные результатов тестового контроля конкретного оператора круглосуточно могут передаваться в центральную базу данных. Сервер «XRT Server Tools» обеспечивает централизованное администрирование пользователей системы, проводит мониторинг эффективности деятельности операторов и контроль качества. Специальный модуль управления библиотекой изображений обеспечивает возможность круглосуточно распространять среди подключенных к серверу тренажеров новых рентгеновских изображений. Это позволяет проводить обучение и оценку компетентности операторов по обнаружению самых последних объектов угроз, путем информации, переданной из разведывательных и полицейских источников. Данная сетевая система обладает следующим недостатком:

– невозможность организации непрерывного обучения и мониторинга деятельности операторов непосредственно на рабочем месте, так как данная система не имеет возможности объединения с технологией проецирования изображений опасных предметов (ПООП).

Важным достижением в практике ОАБ, широко применяемым в западных странах, является разработка и внедрение технологии ПООП. Технология

ПИОП – это технология, которая позволяет проецировать фиктивные предметы, запрещенные к перевозке, на рентгеновское изображение реального багажа пассажира после их сканирования на досмотровом оборудовании [5]. В случае, если оператор не обнаружил опасный предмет в течение определенного промежутка времени, появляется сообщение, указывающее на то, что запрещенный предмет был пропущен. Специальное сообщение обратной связи также появляется при обнаружении опасного предмета или же в случае ложной тревоги, то есть когда оператор указал на то, что опасный предмет находится в багаже, хотя на самом деле опасный предмет не был спроецирован на рентгеновское изображение. При этом необходимо отметить, что первые поколения данной технологии имели определенные недостатки, что ограничивало их в применении, как инструмента обучения, или же, как инструмента контроля деятельности операторов. Эти недостатки были связаны со следующими причинами:

- во-первых, в данной технологии не учитывалось влияние факторов сложности рентгеновского изображения;
- во-вторых, отсутствовала возможность адаптации к индивидуальным особенностям операторов по восприятию и интерпретации изображений;
- в-третьих, досмотровая техника работала в автономном режиме и сохраняла записи результатов деятельности отдельных операторов, что естественно не давало возможности реализовать всесторонний контроль и управление деятельностью всей подсистемой досмотра аэропорта.

Для решения указанных проблем последние поколения системы ПИОП реализованы с применением сетевых технологий (рис. 1). Типичная конфигурация сетевой системы ПИОП состоит из досмотрового оборудования, коммутатора, центрального сервера и автоматизированного рабочего места (АРМ), на котором установлено специальное программное обеспечение (рис. 1) [81]. Также имеется возможность объединения с автоматизированной обучающей системой (АОС).

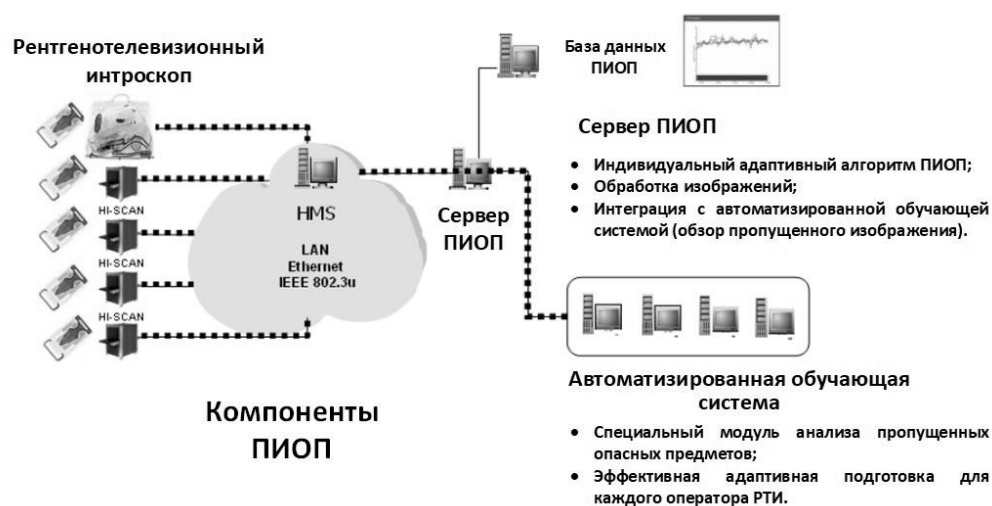


Рис. 1. Пример конфигурации сетевой технологии ПИОП

В настоящее время библиотеки ПИОП насчитывают порядка 20 000 рентгеновских изображений различных опасных предметов при влиянии факторов сложности.

В качестве определенных недостатков рассмотренной технологии можно отметить следующее:

- автономное использование представленных систем на базе конкретного авиапредприятия, не позволяет реализовать всесторонний контроль и централизованное управление подготовкой операторов досмотровой техники на базе сетевого взаимодействия между надзорными органами государства в области авиационной безопасности и авиапредприятиями;
- имеющаяся библиотека образцов изображений ПИОП может содержать изображения, которые не отвечают требованиям надзорных органов РФ в области авиационной безопасности;
- согласно требованиям Международной организации гражданской авиации контроль эксплуатационных параметров технологии ПИОП должны осуществлять надзорные органы государства в области авиационной безопасности, а службы авиационной безопасности авиапредприятий не могли бы вносить изменения в них.

Следующим этапом развития ситуационных центров в Европе явилась реализация с 2012 года Евросоюзом исследовательского проекта «Автоматическое сравнение рентгеновских изображений при сканировании грузов» (*«Automated Comparison of X-ray Images for cargo scanning», ACXIS*) [6]. Основной целью данного проекта является повышение эффективности процедур досмотра грузов на таможенных и пограничных пунктах. Для достижения этой цели были предложены и в настоящее время реализуются следующие решения [7]:

- создание единого центра с независимой базой данных рентгеновских изображений незаконных грузов, а также технологии сетевого обмена информацией между субъектами ОАБ;
- разработка алгоритмов и процедур унификации рентгеновских изображений, полученных с различного досмотрового оборудования;
- разработка специального тренажера в целях подготовки и сертификации таможенных и пограничных служб;
- разработка алгоритмов автоматической идентификации потенциально опасных и незаконных грузов.

Необходимость создания единого стандарта рентгеновского изображения обуславливается большим разнообразием рентгеновской аппаратуры на таможенных и пограничных пунктах контроля, которая отличаются по виду получаемого изображения. Применение сетевых технологий обмена информацией между таможенными и пограничными пунктами контроля позволяет: во-первых, повысить компетентность операторов досмотра по обнаружению незаконных грузов; во-вторых, разработать алгоритмы автоматического распознавания опасных и незаконных грузов на основе методов машинного обучения. Предполагается разработка дополнительных функций помощи операторам, которые будут предоставлять такую полезную информацию, как однородность загрузки, общий или частичный вес и др. Также в рамках дан-

ного проекта ведутся прикладные исследования по изучению особенностей зрительного поиска опасных предметов операторами, что позволит в будущем улучшить алгоритмы автоматического распознавания предметов. В настоящее время база данных состоит более чем из 30 000 изображений законных и незаконных грузов.

Одна из основных задач проекта «ACXIS» – это разработка специальных систем автоматического распознавания изображений для облегчения и улучшения обнаружения как законных, так и незаконных грузов в контейнерах и грузовиках [8]. Предполагается, что рентгеновское изображение будет автоматически анализироваться системой сразу при сканировании, и результаты распознавания могут быть сразу же просмотрены оператором досмотра. База данных будет постоянно дополняться из эталонной базы данных в целях совершенствования обучающихся алгоритмов автоматического распознавания. Эталонная база данных хранит результаты досмотра, стандартизованную рентгеновскую информацию и результаты автоматического распознавания объектов. Возможные примечания операторов досмотра, касающиеся интерпретации изображений, также сохраняются в справочной базе данных.

На основании проведенного анализа зарубежного опыта можно сделать вывод, что один из путей повышения эффективности ОАБ в Российской Федерации, заключается в применении современных сетевых технологий и создании единых ситуационных центров. Это позволит реализовать механизмы своевременного реагирования на новые угрозы, а также повысить эффективность подготовки и объективность контроля качества деятельности операторов досмотра на объектах транспортной инфраструктуры.

Система сетевого управления подготовкой и мониторинга деятельности операторов досмотровой техники

В данной работе предлагается следующая система сетевого контроля деятельности операторов досмотровой техники, аппаратная схема которой представлена на рис. 2.

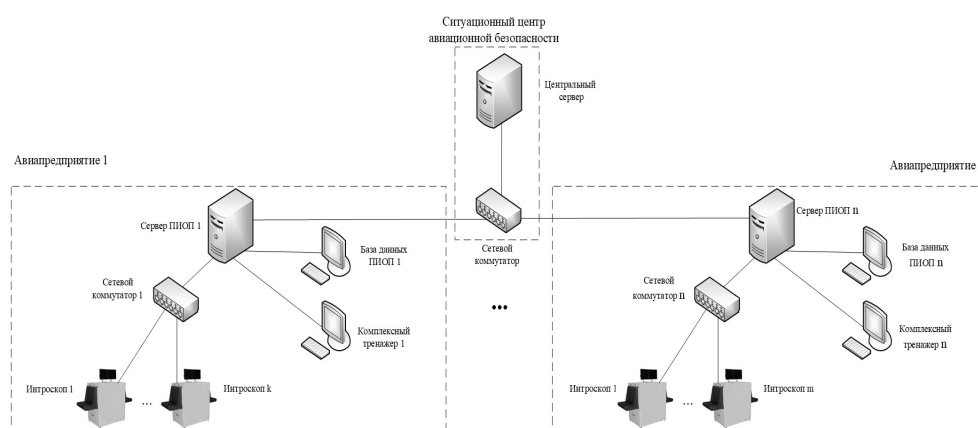


Рис. 2. Аппаратная схема системы сетевого контроля деятельности операторов досмотровой техники

Предложенная система состоит из двух уровней: уровень авиапредприятия и уровень ситуационного центра авиационной безопасности (рис. 2).

На уровне авиапредприятия сетевая технология ПИОП объединена с АОС, что позволяет данной системе работать в 2-х режимах: адаптивном и тестовом. В адаптивном режиме, проецирование опасных предметов на рентгеновское изображение начинается без влияния факторов сложности. Последующее увеличение трудности проецирования опасных предметов связано с влиянием факторов сложности и зависит от индивидуальных характеристик обнаружения конкретного оператора досмотра. Цель данного режима заключается в непрерывном обучении и поддержании бдительности операторов досмотра в период выполнения своих производственных функций. В режиме тестирования каждому оператору проецируется определенное изображение опасного предмета. Целью данного режима является обеспечение надежной оценки индивидуальной компетентности операторов по обнаружению запрещенных предметов. Центральный сервер системы посредством сети собирает данные о пропущенных изображениях, а затем перенаправляет их на АРМ и сервер с АОС. На АРМ происходит первичный анализ данных ПИОП. На сервере с АОС формируются отчеты, графики мониторинга деятельности операторов, рассчитываются индивидуальные оценки уровня подготовленности, а также среднее время принятия решений. Решается задача выбора тестовых изображений, которые в наибольшей степени позволяют адаптировать подготовку к потребностям конкретного оператора на основе данных ПИОП. В связи с этим, в начале следующей производственной сессии на досмотровом оборудовании с использованием ПИОП оператору будет представлен блок тестовых изображений, который соответствуют текущему уровню его потребностей.

На уровне ситуационного центра авиационной безопасности главными составляющими являются база данных и устройство сетевого контроля деятельности операторов досмотровой техники, структурная схема которого показана на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема устройства сетевого контроля деятельности операторов досмотровой техники

Устройство содержит блок согласования с сервером, внешние выходы и входы которого посредством сетевых технологий подключены к периферийным серверам авиапредприятий, первый выход, которого подключен к одному входу блока управления, при этом первый выход этого блока подключен к первому входу блока согласования с сервером (рис. 3). Также дополнительно введены датчик случайных чисел выбора ситуаций, блок тестовых ситуаций, датчик случайных чисел выбора объекта, блок сбора статистических данных и блок пользовательского интерфейса. При этом второй выход блока согласования с сервером через датчик случайных чисел выбора ситуаций и блока тестовых ситуаций подключен к другому входу блока управления, тогда как второй выход блока управления через случайных чисел выбора объекта подключен ко второму входу блока согласования с сервером. Третий выход блока управления через блок сбора статистических данных подключен к блоку пользовательского интерфейса.

Работа данного устройства заключается в следующем: через второй выход блока 2 управления и датчик 5 случайного числа выбора объекта подается команда на блок 1 согласования с сервером о случайном выборе периферийного объекта, одновременно с этим через первый выход блока 2 управления и второй выход блока 1 согласования с сервером на датчик 3 случайного числа выбора ситуаций подается команда на блок 4 тестовых ситуаций о выборе конкретного тестового задания, которое через другой вход блока 2 управления и его первый выход подается на первый вход блока 1 согласования с сервером, а после чего в выбранный случайным образом объект, подключенный через один из внешних выходов блока 1 согласования с сервером, при этом соответствующий вход этого блока получает реакцию внешнего оператора, который через третий выход блока 2 управления попадает в блок 6 сбора статистических данных и по запросу отображается в блоке 7 пользовательского интерфейса.

Одной из ключевых задач при внедрении ситуационного центра является создание базы данных из реалистичных рентгеновских изображений багажа и ручной клади, содержащие запрещенные к провозу вещества и предметы. Качественная база данных играет важную роль как при разработке систем подготовки операторов досмотровой техники, так и при разработке алгоритмов автоматического обнаружения угроз на основе методов распознавания образов. Можно предложить следующие способы формирования такой базы данных. Первый способ заключается в использовании реальных рентгеновских изображений, предоставленных службами авиационной безопасности различных аэропортов. Однако число изображений потенциальных угроз, взятых из реального опыта, остается ограниченным и при этом сбор данных с использованием реальной рентгеновской аппаратуры – задача, требующая времени. В целях преодоления данного недостатка можно рассмотреть возможность создания рентгеновских изображений опасных предметов посредством виртуального моделирования. Суть данного подхода заключается в использовании технологии 3D моделирования объектов и программного обеспечения моделирования неразрушающего контроля «CIVA».

Главной задачей технологии 3D моделирования является создание виртуальных макетов опасных предметов в целях увеличения разнообразия изображений, содержащих угрозы (рис. 4).



Рис. 4. Примеры 3D и 2D моделей опасных предметов [8]

Далее 3D модели различных типов угроз загружаются в моделирующую среду «CIVA». Выбрав необходимую точку обзора и положение опасного предмета посредством виртуального «рентгеновского» сканирования создается 2D модель (проекция) опасного предмета (рис. 4). Спектр источника и параметры детектора рентгеновского сканера с высокой энергией могут быть определены в программном обеспечении симулятора «CIVA». Уровень шума изображений устанавливается таким же, как и в реальных досмотровых системах. Затем смоделированная 2D модель опасного предмета прикрепляется к изображению багажа или ручной клади в выбранной ориентации. Основная сложность данного этапа – это выбор подходящего и реалистичного места для размещения выбранного объекта с угрозой. Используя программное обеспечение «CIVA», можно получать изображение, схожее с изображением, полученным с реального досмотрового оборудования.

Предложенные подходы к созданию единой базы данных рентгеновских изображений имеют свои достоинства и недостатки. Например, в случае если материал, из которого сделан опасный предмет, имеет очень специфичную текстуру, которую трудно смоделировать, необходимо применять изображения с реального досмотрового оборудования. С другой стороны, применение подхода основанного на технологии 3D моделирования объектов при создании единой базы данных является важным компонентом при реализации проактивных механизмов реагирования на новые типы угроз, которые еще не появлялись в реальной практике ОАБ. В связи с этим, наиболее эффективным является комбинированное применение предложенных способов.

Таким образом, предложенная система контроля деятельности операторов досмотровой техники благодаря развитой сетевой инфраструктуре и наличию разработанного устройства сетевого контроля позволит осуществлять независимый контроль и в случае необходимости целенаправленную подготовку операторов. Также появляется возможность своевременно информировать службы авиационной безопасности аэропортов о возникновении актуальных угроз, обнаруженных на любом их подключенных к устройству серверов авиапредприятий. Предложены способы создания базы данных рентгеновских изображений с использованием реальных изображений, полученных с действующего досмотрового оборудования и посредством виртуального моделирования опасных объектов.

Энтропийная модель мониторинга деятельности операторов досмотровой техники

Обзор методов мониторинга деятельности операторов показал, что существующие механизмы характеризуются наличием большого количества отчетов по различным опасным предметам и показателям деятельности (частота обнаружений, и др., выраженных в процентах), что усложняет понимание эффективности работы операторов и не в полной мере дает возможность проводить оценку стабильности их работы в течение времени. В связи, с этим актуальной задачей является совершенствования методов мониторинга деятельности операторов в процессе в процессе выполнения ими профессиональных задач.

Для решения данной задачи предлагается применить энтропийное моделирование [9]. В основе этого метода лежит использование дифференциальной энтропии многомерной случайной величины в качестве критерия оценки функционирования системы. Это обусловлено тем, что энтропия – универсальный параметр, свойственный различным категориям систем. В настоящее время общепринятого определения понятия энтропии не выработано. В общем случае энтропия является количественной мерой беспорядка системы. При этом увеличение энтропии соответствует росту беспорядка (дезорганизованности) в системе, а уменьшение – упорядочиванию (организованности) системы [10].

Согласно данному подходу, деятельность оператора досмотра необходимо представить в виде многомерной случайной величины $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$, компоненты которой $Y_i, (i=1, 2, \dots, m)$ являются одномерными случайными величинами, характеризующими основные вероятностно-временные характеристики деятельности оператора. В данном случае энтропия вектора Y соответствует степени структурной организации и дезорганизации представлений оператора о видах теневого изображения опасных предметов на экране монитора. В случае, если вектор Y имеет нормальное совместное распределение, энтропия системы определяется следующим образом [11]:

$$H(Y) = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \ln |R| \quad (1)$$

где $|R|$ – определитель корреляционной матрицы R случайного нормально распределенного вектора Y равный:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & 1 & p_{23} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & \cdots & 1 \end{pmatrix},$$

где $p_{ij} = \frac{K_{ij}}{\sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2}}$ – коэффициент корреляции пар компонентов Y_i, Y_j ; здесь

$$K_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (y_i - M[Y_i]) \cdot (y_j - M[Y_j]) \cdot f(y_i, y_j) dy_i dy_j \quad \text{ковариация компонентов}$$

Y_i, Y_j , где $M[Y_i], M[Y_j]$ – математические ожидания компонент Y_i и Y_j соответственно; y_i, y_j – пары вещественных чисел, которые при проведении опыта принимают в качестве своего значения компоненты Y_i, Y_j соответственно [11]; $H(Y_i)$ – энтропия каждой из нормальных случайных величин, равная [11]:

$$H(Y_i) = \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)\sigma_{Y_i}^2], i, j = 1, 2, \dots, m,$$

где $\sigma_{Y_i}^2$ – дисперсия случайной величины Y_i .

В случае, если вектор Y не имеет нормальное совместное распределение, энтропия системы равна [9]:

$$H(Y) = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k/Y_1 \dots Y_{k-1}}^2).$$

где $R_{Y_k/Y_1 \dots Y_{k-1}}^2$ – индексы детерминаций соответствующих регрессионных зависимостей, $k = 2 \dots m$.

Согласно модели (1), энтропия системы, описывающей деятельность операторов досмотра, складывается из двух составляющих, которые можно характеризовать как целостность и аддитивность рассматриваемой системы.

Составляющая $\sum_{i=1}^m H(Y_i)$ характеризует предельную энтропию, соответствующую полной независимости элементов системы, то есть энтропию хаотичности, а составляющая $0,5 \ln|R|$ равна энтропии совместной корреляционной взаимосвязи между элементами системы, ее можно охарактеризовать энтропией самоорганизации [11].

Энтропийная модель мониторинга деятельности операторов досмотровой техники представляется следующим образом. Под мониторингом понимается последовательный процесс сбора, обработки и анализа информации о вероятностно-временных параметрах деятельности операторов досмотра с последующим использованием данной информации для решения задач управления системой досмотра.

Анализ деятельности операторов можно проводить по следующим случайным величинам, характеризующим время обнаружения опасных предметов различной категории при интерпретации рентгеновских изображений: Y_1 – время обнаружения самодельного взрывного устройства при интерпретации рентгеновских изображений; Y_2 – время обнаружения огнестрельного оружия при интерпретации рентгеновских изображений; Y_3 – время обнаружения холодного оружия при интерпретации рентгеновских изображений; Y_4 – время обнаружения других опасных предметов (гранаты, мины, патроны, газовые баллончики, электрошокеры) при интерпретации рентгеновских изображений.

В связи с этим, деятельность оператора можно представить в виде вектора $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$. Тогда многомерным случайным величинам

$Y^{(1)} = (Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}, Y_3^{(1)}, Y_4^{(1)})$ и $Y^{(2)} = (Y_1^{(2)}, Y_2^{(2)}, Y_3^{(2)}, Y_4^{(2)})$ будут соответствовать наборы вероятностей при предыдущем и текущем периоде контроля деятельности оператора досмотровой техники. Мониторинг состояния осуществляться путем анализа изменения энтропий векторов случайных величин и их компонентов по следующей формуле [9]:

$$\Delta H(Y) = \sum_{i=1}^4 \ln \frac{\sigma_{Y_k^{(2)}}}{\sigma_{Y_k^{(1)}}} + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^4 \ln \frac{|R_{Y^{(2)}}|}{|R_{Y^{(1)}}|}. \quad (2)$$

где $|R_{Y^{(u)}}|$ – определитель корреляционной матрицы $|R_{Y^{(u)}}|$ случайного вектора $Y^{(u)}$, $k = 2 \dots 4$, $u = 1, 2$.

Представив:

$$\Delta H(Y)_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 \ln \frac{\sigma_{Y_k^{(2)}}}{\sigma_{Y_k^{(1)}}},$$

$$\Delta H(Y)_R = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^4 \ln \frac{|R_{Y^{(2)}}|}{|R_{Y^{(1)}}|},$$

выражение (2) примет следующий вид:

$$\Delta H(Y) = \Delta H(Y)_{\Sigma} + \Delta H(Y)_R,$$

где $\Delta H(Y)_{\Sigma}$ и $\Delta H(Y)_R$ – изменение энтропии вследствие изменения дисперсий и индексов детерминаций соответственно.

В случае, если вектор случайных величин не имеет нормальное распределение, формула принимает следующий вид [12]:

$$\Delta H(Y) = H(Y^{(2)}) - H(Y^{(1)}) = \sum_{i=1}^4 \ln \frac{\sigma_{Y_k^{(2)}}}{\sigma_{Y_k^{(1)}}} + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^4 \ln \frac{1 - R_{Y_k^{(2)}/Y_1^{(2)} \dots Y_{k-1}^{(2)}}^{(2)}}{1 - R_{Y_k^{(1)}/Y_1^{(1)} \dots Y_{k-1}^{(1)}}^{(1)}},$$

где $\sigma_{Y_k^{(u)}/Y_1^{(u)} \dots Y_{k-1}^{(u)}} = \sigma_{Y_k^{(u)}} \sqrt{1 - R_{Y_k^{(u)}/Y_1^{(u)} \dots Y_{k-1}^{(u)}}^2}$, $R_{Y_k^{(u)}/Y_1^{(u)} \dots Y_{k-1}^{(u)}}^2$ – индексы детерминации соответствующих регрессионных зависимостей, $k = 2 \dots 4$, $u = 1, 2$.

Полученные в результате мониторинга значения изменения энтропии будут отражать стабильность деятельности операторов досмотра за исследуемый период времени. Возможны следующие варианты: если $\Delta H(Y) \approx 0$ то за период контроля не наблюдалось изменений, система проявляет признаки стабильности; при $\Delta H(Y) > 0$ можно говорить о повышении неопределенности (нестабильности) деятельности оператора, $\Delta H(Y) < 0$ характеризует обратное явление – повышение стабильности деятельности оператора.

На основе предложенной энтропийной модели можно рассмотреть алгоритм мониторинга деятельности операторов досмотровой техники:

1. Определение изменения энтропии за исследуемый период $t = 1, \dots, s$: $\Delta H(Y)^1, \dots, \Delta H(Y)^s$.

2. Установить период максимального изменения энтропии $\Delta^{\max} H(Y)^s$.

3. Проанализировать компоненты $\Delta^{\max} H(Y)_{\Sigma}^s$ и $\Delta^{\max} H(Y)_R^s$ данного периода.

3.1 В случае $\Delta^{\max} H(Y)_{\Sigma}^s > \Delta^{\max} H(Y)_R^s$ в компоненте k наблюдается большой разброс данных.

3.2 В случае $\Delta^{\max} H(Y)_R^s > \Delta^{\max} H(Y)_{\Sigma}^s$ компонента k недостаточно коррелирует с другими компонентами.

В целях снижения энтропии системы необходимо формирование управляющего воздействия в виде изменения дисперсий компонент деятельности операторов или корреляционных связей между ними.

Таким образом, предложена энтропийная модель мониторинга деятельности операторов в виде дифференциальной энтропии многомерной случайной величины. Показано, что энтропия данной величины включает в себя, как компоненту, характеризующую степень определенности деятельности операторов, так и компоненту, определяющую степень хаотичности (неопределенности). Представлен алгоритм мониторинга деятельности операторов, позволяющей определять компоненту, характеризующую энтропию хаотичности $\Delta H(Y)_{\Sigma}$ или самоорганизации $\Delta H(Y)_R$, которая в наибольшей степени повлияла на рост хаотичности или снижение самоорганизации деятельности операторов. Снижение энтропии всей системы достигается за счет уменьшения дисперсий компонентов или увеличения взаимосвязи между элементами системы.

Направления дальнейших исследований человеческого фактора в системе досмотра аэропорта

Одним из перспективных направлений дальнейших исследований человеческого фактора в области ОАБ является применение технологии регистрации движения глаз (технологии Eye Tracking). Технология Eye tracking – это метод определения координат взора: точки пересечения оптической оси глазного яблока и плоскости наблюдаемого объекта или экрана, на котором находится некий визуальный стимул [13]. Исследование особенностей зрительного поиска опасных предметов в ходе профессиональной подготовки операторов на компьютерных тренажерах позволит:

- обосновать окулографические (окуломоторные) параметры, применение которых позволило бы решить задачу объективной оценки эффективности зрительного поиска опасных предметов операторами досмотра;

- определять эффективные стратегии зрительного поиска и их коррекцию на основе как сравнительного качественного анализа тепловых карт взгляда зрительного поиска запрещенных предметов опытного и неопытного оператора, так и на основе количественного анализа по обоснованным критериям;

- осуществлять дифференциацию степени освоения профессиональных навыков операторами.

Исследования в области особенностей глазодвигательной активности операторов досмотра также позволят разрабатывать системы контроля и мониторинга их состояний в реальном режиме времени в ходе выполнения профессиональных задач [14], а именно систем динамической оценки зрительной усталости операторов на рабочих местах.

Изучение взаимодействия оператора и рентгеновской аппаратуры с помощью технологии Eye Tracking позволит разработать методы оценки эффективности функций улучшения изображений и разработать рекомендации по их совершенствованию. В частности перспективными исследованиями являются разработка и обоснование индикаторов зрительных команд оператора досмотровой техники при создании глазодвигательных интерфейсов. Это позволит внедрить пользовательские интерфейсы в рентгеновскую аппаратуру с функциями управления взглядом на основе специальных технических устройств.

Заключение

В качестве общих выводов можно отметить следующее:

1. На основании проведенного анализа зарубежного опыта был сделан вывод, что один из путей повышения эффективности ОАБ в Российской Федерации, заключается в применении современных сетевых технологий и создании единых ситуационных центров.

2. В работе предложена система сетевого управления подготовкой и мониторинга деятельности операторов досмотровой техники, состоящая из ситуационного центра авиационной безопасности с центральным сервером и базой данных, объединенным посредством сетевых технологий с серверами систем ПИОП аэропортов. Разработано устройство сетевого контроля деятельности операторов досмотровой техники, которое позволяет осуществлять независимый контроль и их целенаправленную подготовку, а также своевременно информировать службы авиационной безопасности о возникновении актуальных угроз, обнаруженных на любом их подключенных к устройству серверов авиапредприятий. Предложены способы создания базы данных рентгеновских изображений с использованием реальных изображений и посредством виртуального моделирования опасных объектов.

3. Предложена энтропийная модель мониторинга деятельности операторов в виде дифференциальной энтропии многомерной случайной величины. Показано, что энтропия данной величины включает в себя, как компоненту, характеризующую степень определенности деятельности операторов, так и компоненту, определяющую степень хаотичности (неопределенности). Представлен алгоритм мониторинга деятельности операторов, позволяющей определять компоненту, характеризующую энтропию хаотичности или самоорганизации, которая в наибольшей степени повлияла на рост хаотичности или снижение самоорганизации деятельности операторов. Снижение энтропии всей системы достигается за счет уменьшения дисперсий компонентов или увеличения взаимосвязи между элементами системы.

4. Одним из перспективных направлений дальнейших исследований человеческого фактора в области ОАБ является применение технологии ре-

гистрации движения глаз. Применение данной технологии в ходе профессиональной подготовки операторов на компьютерных тренажерах позволит повысить эффективность обучения. Также исследования в области особенностей глазодвигательной активности операторов досмотра позволят разработать системы контроля и мониторинга их состояний в реальном режиме времени в ходе выполнения профессиональных задач.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55584–2013. Воздушный транспорт. Обеспечение авиационной безопасности в аэропортах. Термины и определения. – Введ. 2014-07-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
2. Ольшанский, Ю. И. Методы выявления взрывчатых веществ / Ю. И. Ольшанский // Системы безопасности, связи и коммуникаций. – 1998. – № 20 (3). – С. 49–54.
3. Человеческий фактор в системе мер безопасности гражданской авиации. Doc 9808 AN/765. Изд. 1. Монреаль: ИКАО, 2002. – 120 с.
4. Schwaninger, A. Reacting to the terror threat. Analyzing, controlling and adapting to the meet new threats / A. Schwaninger // Airport. – 2006. – Vol. 5 – P. 30–31.
5. Hofer, F. Using threat image projection data for assessing individual screener performance / F. Hofer, A. Schwaninger // Safety and Security Engineering. – 2005. – Vol. 82 – P. 417–426.
6. Automated comparison of x-ray images for cargo scanning / W. Visser, A. Schwaninger, D. Hardmeir, A. Flisch, M. Costin, C. Vienne, F. Sukowski, U. Hassler, I. Dorion, A. Marciano, G. Koomen, M. Slegt, A. Cesare Canonica // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. – 2016. – Vol. 50. – P. 268–276.
7. Creating a reference database for cargo inspection X-ray images using high energy CT of cargo mock-ups / S. Kolokytha, A. Flisch, T. Lüthi, M. Plamondon, S. Hartmann, W. Vasser, A. Schwaninger, D. Hardmeier, M. Costin, C. Vienne, F. Sukowski, U. Hassler, I. Dorion, A. Canonica, E. Rochat, G. Koomen, M. Slegt // IEEE Instrumentation and measurement society. – 2016. – P. 249–254.
8. Improving customs' border control by creating a references database of cargo inspection X-ray images / S. Kolokytha, A. Flisch, T. Lüthi, M. Plamondon, A. Schwaninger, W. Vasser, D. Hardmeier, M. Costin, C. Vienne, F. Sukowski, U. Hassler, I. Dorion, N. Gadi, S. Maitrejean, A. Marciano, A. Canonica, E. Rochat, G. Koomen, M. Slegt // Technology and Engineering Systems Journal. – 2017. – Vol. 2 (3) – P. 60–66.
9. Тырсин, А. Н. Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем : монография / А. Н. Тырсин. – Воронеж : Научная книга, 2016. – 156 с.
10. Прангишвили, И. В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системы / И. В. Прангишвили. – М. : Наука, 2003. – 428 с.
11. Тырсин, А. Н. Энтропийно-вероятностное моделирование гаусовских стохастических систем / А. Н. Тырсин, И. С. Соколова // Математическое моделирование, 2012. – Т. 24. – № 1. – С. 88–102.
12. Волков, А. К. Применение энтропийно-вероятностной модели оператора рентгенотелевизионного интроскопа в алгоритме работы компьютерного тренажера в процессе подготовки сотрудников пункта досмотра / А. К. Волков, В. В. Юдаев, Л. В. Кузоваткина // Научный вестник МГТУ ГА. – М. : МГТУ ГА, 2016. – Т. 19, № 4. – С. 113–117.
13. Барабанщиков, В. А. Айтрекинг. Методы регистрации движения глаз в психологических исследованиях и практике / В. А. Барабанщиков, А. В. Жегало. – М. : Когито-Центр, 2014. – 128 с.

14. Волков, А. К. Применение системы регистрации движения глаз для оценки окуломоторных параметров зрительного поиска опасных предметов операторами досмотра / А. К. Волков // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2017 : матер. междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 14–15 нояб. 2017 г.). – СПб. : ИПТ РАН, 2017. – С. 359–363.

Волков Александр Константинович
аспирант,
Ульяновский институт гражданской
авиации имени Главного маршала
авиации Б. П. Бугаева
E-mail: oabuvauga@mail.ru

Volkov Alexander Konstantinovich
postgraduate student,
Ulyanovsk Institute of civil aviation
named after Chief Marshal
of aviation B. P. Bugaev

УДК 658.71.08, 519.87

Волков, А. К.

Система сетевого управления подготовкой и мониторинга деятельности операторов досмотровой техники / А. К. Волков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 105–121.

**ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЕ СТАНКА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ
В ШПИНДЕЛЬНОМ УЗЛЕ**

А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, С. А. Игнатьев, Я. Ш. Шамсадова

**APPLICATION OF AUTOCORRELATED FUNCTIONS
OF VIBROACOUSTIC VIBRATIONS IN THE DYNAMIC
SYSTEM OF THE MACHINE FOR IDENTIFICATION
OF DEFECTS IN THE SPINDLE UNIT**

A. A. Ignatyev, V. A. Dobryakov, S. A. Ignatyev, Ya. Sh. Shamsadova

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из наиболее эффективных методов выявления дефектов в работающем оборудовании является вибродиагностический, в основе которого лежит регистрация виброакустических колебаний в динамической системе станка, выделение спектральных составляющих и установление их связи с дефектами. Целью работы является обоснование возможности применения автокорреляционных функций виброакустических колебаний в динамической системе станка при шлифовании дорожки качения колец подшипников для выявления дефектов в шпиндельном узле. *Материалы и методы.* На основе предложенной модифицированной схемы динамической системы станка выполнен теоретический анализ возможности выделения основных частот вибраций, связанных с дефектами в шпиндельном узле, с использованием автокорреляционных функций (АКФ) зарегистрированных виброакустических (ВА) колебаний. *Результаты.* Предлагаемая методика обнаружения дефектов в шпиндельном узле шлифовального станка SIW-5 позволила распознать дефект, заключающийся в дисбалансе абразивного круга. Путем разложения АКФ в ряд Фурье можно установить наличие других дефектов подшипниковых опор шпиндельного узла. *Выводы.* Теоретические и экспериментальные исследования ВА колебаний динамической системы шлифовальных станков показали, что с помощью АКФ можно достаточно эффективно отделить случайные составляющие колебаний от детерминированных, связанных с дефектами шпиндельного узла.

Ключевые слова: автоматизированный станок, динамическая система, виброакустические колебания, автокорреляционная функция, шпиндельный узел, выявление дефектов.

Abstract. *Background.* One of the most effective methods of identification of defects in the working equipment is vibrodiagnostic which cornerstone registration of vibroacoustic vibrations in the dynamic system of the machine, allocation of spectral components and establishment of their communication with defects is. The purpose of work is justification of a possibility of application of autocorrelated functions of vibroacoustic vibrations in the dynamic system of the machine when grinding a path of swing of rings of bearings for identification of defects in a spindle unit. *Materials and methods.* On the basis of the offered modified scheme of dynamic system of the machine the theoretical analysis of a possibility of allocation of base frequencies of the vibrations connected with defects in a spin-

dle unit, with use of autocorrelated functions (AKF) of the registered vibroacoustic (VA) fluctuations is made. *Results.* The offered technique of detection of defects in a spindle unit of the SIW-5 grinder allowed to recognize the defect consisting in an imbalance of an abrasive wheel. By decomposition of AKF in a row Fourier can establish availability of other defects of bearing support of a spindle unit. *Conclusions.* Theoretical and pilot studies of VA of fluctuations of dynamic system of grinders showed that by means of AKF it is possible to separate rather effectively accidental components of fluctuations from determined, connected with defects of a spindle unit.

Key words: the automated machine, dynamic system, vibroacoustic vibrations, autocorrelated function, spindle unit, identification of defects.

Проблема обеспечения заданной технологической надежности автоматизированных станков является весьма актуальной для современного производства высокоточных деталей для машино- и приборостроения. Важное место при этом отводится как приемо-сдаточным испытаниям станков, так и испытаниям в производственных условиях, осуществляемых после технического обслуживания или ремонта [1–3].

Среди всего комплекса методов испытания станков значительное место отводится динамическим испытаниям, основанным на измерении и анализе виброакустических (ВА) колебаний основных узлов станков [4–6]. Результаты испытаний, проведенных по научно обоснованным методикам, обеспечивают достоверную оценку динамического качества станков, контроль технического состояния и диагностирование узлов (в том числе контроль состояния инструмента), а также корректировку значений параметров режима обработки, направленную на повышение ее эффективности [7].

Обработка регистрируемых ВА колебаний осуществляется по различным методикам с помощью специального программно-математического обеспечения [8, 9] для формирования характеристик, отвечающих решению поставленной задачи испытаний станков.

Исследования динамических характеристик автоматизированных токарных и шлифовальных станков, выполненные в Саратовском государственном техническом университете, позволили обосновать эффективность использования как спектральной плотности мощности (СПМ), так и автокорреляционных функций (АКФ) ВА колебаний динамической системы (ДС) станков для оценки их динамического качества и определения целесообразных значений параметров режима резания на основе вычисления запаса устойчивости ДС [3, 5, 7, 10].

В соответствии с работой В. А. Кудинова динамическая система станка образуется совокупностью упругой системы (УС) и рабочих процессов в их взаимодействии [11]. В свою очередь, УС включает в себя собственно станок, деталь, инструмент, приспособление.

При обработке деталей, например, при круглом или внутреннем шлифовании колец подшипников, основными источниками ВА колебаний в УС являются процесс резания и шпиндельные узлы (ШУ) инструмента и детали. В этом случае известная схема эквивалентной ДС станка (по В. А. Кудинову) может быть модифицирована выделением в УС двух ШУ (рис. 1).

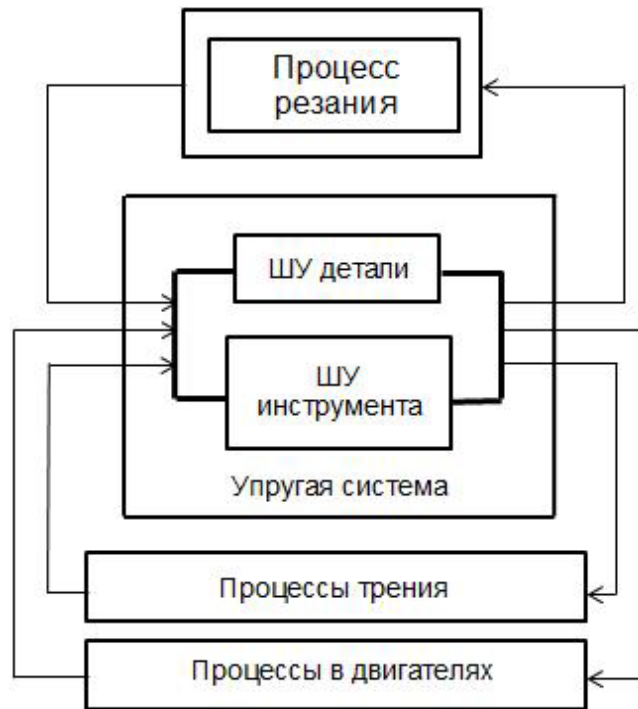


Рис. 1. Модифицированная схема эквивалентной динамической системы шлифовального станка

В силу того, что техническое состояние ШУ станков существенно влияет на точность обработки деталей [12], измерению их ВА колебаний уделяется большое внимание [5, 13]. Следует отметить, что основные частоты в спектре вибраций ШУ рассчитаны [14], тогда каждая из подшипниковых опор шпинделей может быть представлена в виде параллельного соединения колебательных звеньев с передаточными функциями вида

$$W_i(p) = \frac{K_i}{T_i^2 p^2 + 2\varepsilon_i T_i p + 1},$$

где K_i , ε_i – коэффициент передачи и параметр затухания i -го звена; p – оператор Лапласа; T_i – постоянная времени, определяющая частоту колебаний одной из компонент спектра вибраций.

В соответствии с данными работы [14] параллельно соединенных колебательных звеньев пять, собственные частоты которых определяются, во-первых, обратной частотой вращения шпинделя ($W_1(p)$), во-вторых, частотой вращения сепаратора ($W_2(p)$), в-третьих, частотой перекачивания шариков по наружному кольцу ($W_3(p)$), в-четвертых, частотой перекачивания шариков по внутреннему кольцу ($W_4(p)$), в-пятых, частотой вращения шариков ($W_5(p)$).

Авторами установлена возможность применения АКФ ВА колебаний ШУ шлифовального станка для его диагностирования. Это объясняется тем, что в процессе функционирования в технически исправном станке при реза-

нии возбуждаются вибрации с достаточно равномерным спектром в диапазоне до 4...5 кГц, то есть спектр близок с определенным допущением к сигналу типа «белый шум» [5, 10], причем его АКФ является быстро затухающей функцией. Если в процессе эксплуатации в ШУ возникает какой-либо дефект, например, нарушается балансировка шпинделя или наблюдается дефект в элементах подшипников, то амплитуда соответствующих гармоник спектра вибраций увеличивается [8, 9, 14]. Расчет частот вибраций для основных дефектов подшипников приведен в [15]. В этом случае в АКФ наблюдаются незатухающие колебания, то есть спектр АКФ будет содержать одну или несколько гармонических составляющих с достаточно большой амплитудой, определяемых тем или иным дефектом в подшипнике ШУ.

В нашем случае основной задачей является обнаружение дефектов в ШУ непосредственно при обработке для признания его работоспособным или неработоспособным в зависимости от амплитуды гармоник. Детальный анализ дефектов в отличие от анализа по методике, изложенной в работе [16], выполняется на специальном стенде для диагностирования и испытаний ШУ.

Математическим обоснованием указанного выше служит следующее. При условии, что УС станка возбуждается сигналом типа «белый шум», регистрируемый на ШУ вибросигнал $Y(t)$ будет в простейшем случае какого-либо одного дефекта в подшипнике содержать гармонический сигнал $U(t) = A \sin \omega t$ и стохастический сигнал типа «белый шум» $\xi(t)$.

$$Y(t) = U(t) + \xi(t). \quad (1)$$

Автокорреляционная функция выходного сигнала $K_{yy}(\tau)$ является моментной функцией 2-го порядка [17]

$$K_{yy}(\tau) = M \{ [U(t) + \xi(t)] [U(t + \tau) + \xi(t + \tau)] \}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует:

$$K_{yy}(\tau) = K_{uu}(\tau) + K_{\xi\xi}(\tau) + K_{u\xi}(\tau) + K_{\xi u}(\tau). \quad (3)$$

В последней формуле первые два слагаемых соответствуют АКФ исходных сигналов, а два других слагаемых – взаимокорреляционным функциям исходных сигналов. Известно [17], что АКФ сигнала типа «белый шум» $K_{\xi\xi}(\tau)$ по форме близка к дельта-функции, то есть быстро затухает, а взаимокорреляционные функции $K_{\xi u}(\tau)$ и $K_{u\xi}(\tau)$ равны нулю, так как корреляция между сигналами $u(t)$ и $\xi(t)$ отсутствует. Исходя из этих соображений при достаточно большой величине τ из формулы (3) следует

$$K_{yy}(\tau) \approx K_{uu}(\tau). \quad (4)$$

Следовательно, результирующая АКФ $K_{yy}(\tau)$ фактически будет АКФ гармонического сигнала, которая, в свою очередь, также является гармониче-

ской с той же частотой, что и исходный сигнал $U(t)$. Последнее утверждение следует из приведенных ниже вычислений.

Регистрируемый сигнал, учитывая формулу (1), имеет вид:

$$Y(t) = A \sin \omega t + \xi(t). \quad (5)$$

Для вычисления АКФ в формуле (4) используем формулу [15]:

$$K_{uu}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T Y(t) Y(t + \tau) dt. \quad (6)$$

Используя выражение (5) из формулы (6) имеем:

$$K_{uu}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin \omega t \sin \omega(t + \tau) dt. \quad (7)$$

Тогда получаем для регистрируемого сигнала

$$K_{yy}(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos \omega \tau. \quad (8)$$

Если в подшипниках ШУ присутствует несколько дефектов, то регистрируемый ВА сигнал является суммой полигармонического сигнала и сигнала типа «белый шум»:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin \omega_i t + \xi(t), \quad (9)$$

где $A_i \sin \omega_i t$ – гармоника, определяемая i -м дефектом.

В этом случае по аналогии с формулой (8) будем иметь

$$K_{yy}(\tau) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{2} \cos \omega_i \tau, \quad (10)$$

то есть результирующая АКФ также содержит все гармонические составляющие, что и исходный сигнал.

В качестве экспериментальной иллюстрации изложенного на рис. 2,а изображена АКФ ВА колебаний, зарегистрированных на внутришлифовальном станке модели SIW-5 при обработке дорожек качения колец подшипников 42726/01 из стали ШХ-15 при следующих значениях режима резания: частота вращения кольца 280 об/мин, частота вращения круга 6200 об/мин, подача круга 0,2 мм/мин. В станке используется бесступенчатое регулирование частоты вращения шпинделей, что исключает появление «зубчатых частот» в спектре колебаний ШУ. Для измерения ВА колебаний при резании использовался виброизмеритель ВШВ-003-М2 с датчиком ДН-3, устанавливавшимся на ШУ инструмента на магнитной опоре. Диапазон фиксируемых частот – до 4 кГц. Далее сигналы с виброизмерителя подавались на компьютер и обрабатывались с помощью программного продукта Matlab.

Из анализа рис.2а можно сделать вывод, что в АКФ присутствует периодическая составляющая с частотой 112 Гц, которая соответствует частоте вращения шпинделя инструмента и обусловлена дисбалансом абразивного круга. Это позволяет выявить дефект и его локализовать, то есть фактически выполнить диагностирование ШУ. После устранения дисбаланса круга АКФ приобрела вид затухающей косинусоиды, изображенный на рис.2б. Ее можно использовать для оценки динамического качества станков и выбора режима резания по методике, изложенной в работах [7, 10].

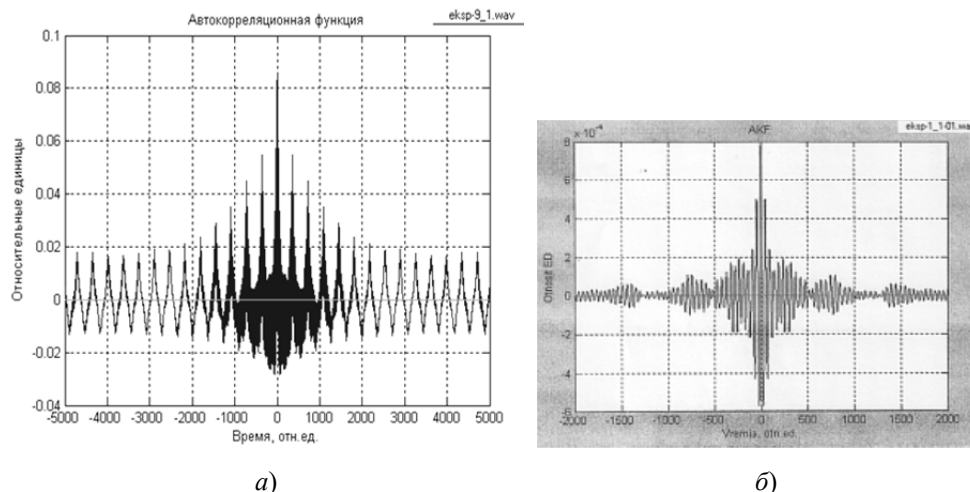


Рис. 2. Автокорреляционные функции при обработке наружных колец подшипников на внутришлифовальном станке SIW-5, где 1отн. ед. времени = $2 \cdot 10^{-5}$ с

Таким образом, проведенный теоретический анализ вибрационных процессов в динамической системе станка показал возможность идентификации дефектов в шпиндельном узле, связанных с дисбалансом абразивного круга и других дефектов в подшипниковых опорах по спектру АКФ виброакустических колебаний. Указанное получило экспериментальное подтверждение при анализе реальных АКФ виброакустических колебаний в динамической системе шлифовального станка SIW-5 при обработке дорожки качения колец подшипников.

Библиографический список

1. Проников, А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1985. – 288 с.
2. Расторгуев, Г. А. Системный обзор испытаний технологического оборудования / Г. А. Расторгуев // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – № 1. – С. 3–10.
3. Бржозовский, Б. М. Диагностика и надежность автоматизированных систем / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. В. Мартынов, А. Г. Схиртладзе. – Саратов : СГТУ, 2007. – 352 с.
4. Аршанский, М. М. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 136 с.

5. Бржозовский, Б. М. Оперативный контроль и динамические испытания металлорежущих станков: обзор. информ. / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, В. В. Мартынов. – М. : ВНИИТЭМР, 1991. – 61 с.
6. Тугенгольд, А. К. Мониторинг состояния станков и станочных систем / А. К. Тугенгольд, В. Р. Димитров, Р. Н. Волошин // СТИН. – 2017. – № 3. – С. 11–17.
7. Игнатьев, А. А. Стохастические методы идентификации в динамике станков / А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова, С. А. Игнатьев. – Саратов : СГТУ, 2013. – 124 с.
8. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
9. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудование. Анализ вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб. : Севзапучцентр, 2013. – 152 с.
10. Игнатьев, А. А. Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний / А. А. Игнатьев, Е. М. Самойлова, Я. Ш. Шамсадова // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 90–98.
11. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 360 с.
12. Пуш, А. В. Шпиндельные узлы: качество и надежность / А. В. Пуш. – М. : Машиностроение, 1992. – 288 с.
13. Диагностика и мониторинг опор шпиндельных узлов / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров, Е. М. Дудко и др. // СТИН. – 2013. – № 6. – С. 2–15.
14. Козочкин, М. П. Виброакустическая диагностика шпиндельных узлов / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров // СТИН. – 2009. – № 5. – С. 8–12.
15. Бальмонт, В. Б. Вибрация и шум подшипников качения: обзор / В. Б. Бальмонт, О. И. Самохин, Е. Б. Варламов, А. М. Авдеев. – М. : ЦНИИТЭИавтопром, 1987. – 82 с.
16. Диагностика автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, М. П. Козочкин и др. – М. : Машиностроение, 2011. – 600 с.
17. Мирский, Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.

Игнатьев Александр Анатольевич
 доктор технических наук, профессор,
 кафедра автоматизации, управления,
 мехатроники,
 Саратовский государственный
 технический университет
 имени Ю.А. Гагарина
 E-mail: atp@sstu.ru

Ignatyev Alexander Anatolyevich
 doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of automation,
 control, mechatronics,
 Saratov State Technical University
 named after Yu. A. Gagarin

Добряков Владимир Анатольевич
 кандидат технических наук, доцент,
 кафедра автоматизации, управления,
 мехатроники,
 Саратовский государственный
 технический университет
 имени Ю. А. Гагарина
 E-mail: atp@sstu.ru

Dobryakov Vladimir Anatolyevich
 candidate of technical sciences,
 associate professor,
 sub-department of automation,
 control, mechatronics,
 Saratov State Technical University
 named after Yu. A. Gagarin

Игнатъев Станислав Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматизации, управления,
мехатроники,
Саратовский государственный
технический университет
имени Ю. А. Гагарина
E-mail: atp@sstu.ru

Ignatyev Stanislav Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of automation,
control, mechatronics,
Saratov State Technical University
named after Yu. A. Gagarin

Шамсадова Яха Шаидовна

соискатель,
кафедра автоматизации, управления,
мехатроники,
Саратовский государственный
технический университет
имени Ю. А. Гагарина
E-mail: atp@sstu.ru

Shamsadova Yakha Shaidovna

applicant,
sub-department of automation, control,
mechatronics,
Saratov State Technical University
named after Yu. A. Gagarin

УДК 681.5

Игнатъев, А. А.

Применение автокорреляционных функций виброакустических колебаний в динамической системе станка для выявления дефектов в шпиндельном узле / А. А. Игнатъев, В. А. Добряков, С. А. Игнатъев, Я. Ш. Шамсадова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 122–129.

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ABS-ПЛАСТИКА,
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ***Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек***IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE ABS-PLASTIC
MODEL OBTAINED BY THE METHOD OF FLARE SURFACE***E. D. Kartashova, A. Yu. Muizemnek*

Аннотация. *Актуальность и цели.* Устойчивыми тенденциями развития аддитивных технологий являются ежегодный рост объема производимых с их использованием изделий и увеличение доли функциональных изделий в общем объеме производимой продукции при уменьшении доли прототипов. Появляются новые и совершенствуются существующие аддитивные технологии. Появляются более производительные, дешевые и доступные устройства 3D-печати, обеспечивающие быстрое и стабильное изготовление качественной и дешевой продукции. Постоянно появляются новые материалы для 3D-печати. Одной из причин, сдерживающей более широкое применение аддитивных технологий для изготовления функциональных изделий, часто являются относительно низкие характеристики механических свойств материалов, формируемые при 3D-печати. Прежде всего, это характеристики сопротивления деформированию и разрушению. Целью работы является исследование сопротивления деформированию и разрушению ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, и идентификация параметров его модели. В качестве модели материала использована модель Леонова-EPG. *Материалы и методы.* В качестве исследуемого материала выбран ABS-пластик, выпускаемый ООО «РЭК». При изучении сопротивления деформированию и разрушению ABS-пластика выбран метод лабораторных испытаний материалов на растяжение, при идентификации параметров модели материала – численные методы решения оптимизационных задач, реализованные в САЕ-системе. *Результаты.* Построены диаграммы деформирования ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, идентифицированы параметры модели Леонова-EPG. *Выводы.* Особенностью сопротивления растяжению ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, является то, что после первого пика напряжений происходит его разупрочнение с последующим упрочнением вплоть до разрушения. Это поведение может быть описано с помощью модели Леонова-EPG.

Ключевые слова: ABS-пластик, 3D-печать, сопротивление деформированию и разрушению, модель Леонова-EPG, идентификация, параметры.

Abstract. *Background.* Stable trends in the development of additive technologies are the annual growth in the volume of products produced with their use and the increase in the share of final products in the total volume of products due to a decrease in the share of prototypes. New additive technologies are emerging and improving. There are more productive, cheap and affordable 3D-printing devices, providing fast stable production of high-quality and cheap products. Constantly there are new materials for 3D-printing. One of the reasons restraining the wider use of additive technologies is often the relatively low characteristics of the mechanical properties of materials formed with 3D printing. First of all, they

are characteristics of resistance to deformation and destruction. The aim of the work is to study the resistance to deformation and destruction of ABS plastic obtained by the method of layer-by-layer fusing and identification of the parameters of its model. The model of the material is the Leonov-EPG model. *Materials and methods.* As the test material selected ABS-plastic, produced by the company REC. When studying the resistance to deformation and destruction of ABS plastic, the method of laboratory testing of materials for stretching was chosen, when identifying the parameters of the material model – methods numerical methods for solving optimization problems implemented in the CAE-system. *Results.* The diagrams of deformation of ABS plastic obtained by the method of layer-by-layer fusion are constructed, the parameters of the Leonov-EPG model are identified. *Conclusions.* A feature of the resistance to stretching of ABS plastic, obtained by the method of layer-by-layer fusion, is that after the first peak of stresses, it softens and then strengthens until it breaks down. This behavior can be described using the Leonov-EPG model.

Key words: ABS plastic, 3D-printing, resistance to deformation and destruction, Leonov-EPG model, identification, parameters.

Введение

Устойчивыми тенденциями развития аддитивных технологий являются ежегодный рост объема производимых с их использованием изделий и увеличение доли функциональных изделий в общем объеме производимой продукции при уменьшении доли прототипов. Так, объем мирового рынка 3D-печати в 2018 году составил более 12 миллиардов долларов. Прогнозируемые значения мирового рынка 3D-печати в 2019, 2020 и 2021 годах составляют более 15, 20 и 26 миллиардов долларов соответственно [1].

Появляются новые и совершенствуются существующие аддитивные технологии. Появляются более производительные, дешевые и доступные устройства 3D-печати, обеспечивающие быстрое стабильное изготовление качественной и дешевой продукции. Одной из наиболее распространенных технологий 3D-печати является технология послойного наплавления (Fused deposition modeling – FDM).

Постоянно появляются новые материалы для 3D-печати. Одним из отечественных предприятий, выпускающих широкую номенклатуру конкурентных пластиков, является ООО «РЭК». Выпускаемый этим предприятием ABS-пластик предназначен для 3D печати изделий, несущих нагрузку, таких как шестерни механизмов, корпуса, крючки, рукоятки, держатели, так как обеспечивает высокую прочность и долговечность изделий. Он поддается механической обработке и покраске.

Одной из причин, сдерживающей более широкое применение аддитивных технологий для изготовления функциональных изделий, часто являются относительно низкие характеристики механических свойств материалов, формируемые при 3D-печати. Прежде всего это характеристики сопротивления деформированию и разрушению.

Целью работы является исследование сопротивления деформированию и разрушению ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, и идентификация параметров его модели. В качестве модели материала использована модель Леонова-EPG.

Упруго-вязкопластическая модель материала Леонова-EGP

Далее рассматривается модель материала Леонова, которая является частным случаем модели Эйндховена (Eindhoven Glassy Polymer – EGP) [2–4]. Модель Леонова-EGP представляет собой упруго-вязкопластическую модель материала, которая описывает сопротивление деформированию при конечных деформациях с учетом скорости деформации и давления. Она способна описывать механическое поведение некоторых полимерных материалов, таких как поликарбонат, полиэтилентерефталат, полипропилен. Эти полимеры при растяжении, как правило, после первого пика напряжений проявляют разупрочнение с последующим упрочнением, как показано на рис. 1.

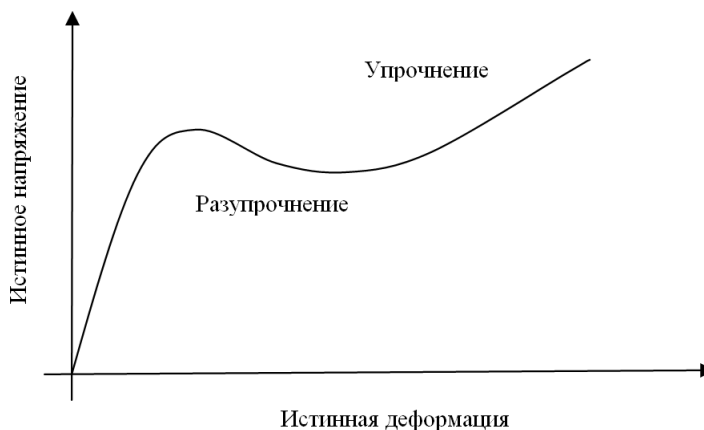


Рис. 1. Схематическое изображение кривой «напряжение–деформация»

Модель материала Леонова-EGP основана на мультипликативном разложении градиента деформации $\mathbf{F}$ на упругую $\mathbf{F}_e$ и пластичную часть $\mathbf{F}_p$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{F}_p. \quad (1)$$

Как обычно при конечных деформациях левый упругий тензор деформации Коши-Грина определяется выражением

$$\mathbf{b}_e = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{F}_e^T, \quad (2)$$

где T – оператор транспонирования.

Правый пластический тензор деформации Коши-Грина определяется выражением

$$\mathbf{C}_e = \mathbf{F}_p^T \cdot \mathbf{F}_p. \quad (3)$$

С общей точки зрения, пластическое течение для изотропного упруго-вязкопластического материала при конечных деформациях определяется следующим образом:

$$-\frac{1}{2} \mathbf{b}_e^L \mathbf{b}_e^{-1} = \dot{p} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\tau}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p, \quad (4)$$

где $\mathbf{b}_e^L = \mathbf{F} \cdot \frac{d}{dt}(\mathbf{C}_p^{-1}) \cdot \mathbf{F}^T$; точкой сверху обозначена производная по времени; верхним индексом «L» – объектная производная Ли; $\dot{\epsilon}^p$ – накопленная пластическая деформация; f – поверхность текучести; $\boldsymbol{\tau}$ – тензор напряжений Кирхгофа.

Тензор напряжений Кирхгофа связан с тензором напряжений Коши выражением $\boldsymbol{\tau} = J \boldsymbol{\sigma}$, где J – детерминант градиента деформации $\mathbf{F}$.

Разложение тензора напряжений Коши

В модели Леонова-EGP тензор напряжений Коши разбивается на напряжение упрочнения и напряжение движения, т. е.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_r + \boldsymbol{\sigma}_s. \quad (5)$$

Напряжение упрочнения можно получить на основе модели Эйндровена (6) или модели нео-Гука (7)

$$\boldsymbol{\sigma}_r = J^{-2/3} G_r \mathbf{b}^d, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_r = J^{-5/3} G_r \mathbf{b}^d. \quad (7)$$

В обоих выражениях G_r обозначает модуль упрочнения, $\mathbf{b}^d$ – девиаторную часть левого тензора деформаций Коши-Грина $\mathbf{b} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$.

Напряжение движения разделяется на девиаторную $\boldsymbol{\sigma}_s^d$ и гидростатическую $\boldsymbol{\sigma}_s^h$ части

$$\boldsymbol{\sigma}_s = \boldsymbol{\sigma}_s^d + \boldsymbol{\sigma}_s^h. \quad (8)$$

Гидростатическая часть напряжения движения является функцией модуля объемного сжатия K

$$\boldsymbol{\sigma}_s^h = K(J-1)\mathbf{I}. \quad (9)$$

где $\mathbf{I}$ – единичный тензор второго ранга.

Девиаторная часть напряжения движения определяется как

$$\boldsymbol{\sigma}_s^d = G J^{-2/3} \mathbf{b}_e^d, \quad (10)$$

где G – модуль сдвига; $\mathbf{b}_e^d$ – девиаторная часть левого упругого тензора деформации Коши-Грина $\mathbf{b}_e$; J – детерминант градиента деформации.

Функция вязкости

Для модели Леонова-EGP закон пластического течения связан с напряжением Мизеса для девиаторной части тензора напряжений движения Коши следующим образом

$$(\boldsymbol{\sigma}_s^d)_{eq} = 3 \eta(T, \sigma_m, \sigma_{eq}, S) \dot{p}, \quad (11)$$

где напряжение Мизеса определяется следующим образом

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_s^d : \sigma_s^d} . \quad (12)$$

Функция вязкости $\eta(T, \sigma_m, \sigma_{eq}, S)$ зависит от температуры T , гидростатического давления σ_m , скорости накопленной пластической деформации $\dot{p}$ и параметра состояния S . Она задается выражением

$$\eta(T, \sigma_m, \sigma_{eq}, S) = \eta_{0,r}(T) \exp\left[\frac{\mu \sigma_m}{\tau_0}\right] \frac{\sigma_{eq}/\tau_0}{\sinh(\sigma_{eq}/\tau_0)} \exp(S), \quad (13)$$

где $S(t, T, \gamma_p) = S_a(t, T) R_p(\gamma_p)$; $S_a(t, T) = c_0 + c_1 \log\left(\frac{t_{eff} + t_a}{t_0}\right)$;

$$R_p(\gamma_p) = \left[\frac{1 + (\tau_0 \exp(\gamma_p))^{r_1}}{1 + (r_0)^{r_1}} \right]^{\frac{r_2-1}{r_1}},$$

где $\eta_{0,r}(T)$ – коэффициент начальной вязкости, который зависит от температуры; τ_0 – характерное напряжение; μ – коэффициент зависимости от давления.

В этом определении функции вязкости накопленная пластическая деформация определяется как функция скорости пластической деформации следующим образом:

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^p : \dot{\epsilon}^p} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{\gamma}^p . \quad (14)$$

Параметр состояния $S(t, T, \gamma_p)$ имеет два сомножителя, которые действуют независимо и учитывают кинетику разупрочнения и старения соответственно:

$R_p(\gamma_p)$ описывает кинетику разупрочнения, которая является функцией накопленной пластической деформации p и трех материальных коэффициентов r_0 , r_1 и r_2 .

$S_a(t, T)$ описывает кинетику старения, которая зависит от четырех параметров материала: временных коэффициентов c_0 и c_1 , начального времени t_a , отсчетного времени t_0 и эффективного времени t_{eff} . Последнее определяется следующим образом:

$$t_{eff} = \int_0^t \frac{d\xi}{\alpha_T(T(\xi)) \alpha_\sigma(\xi)}, \quad (15)$$

где $\alpha_T(T) = \exp\left[\frac{\Delta U_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]$, $\alpha_\sigma(\sigma_{eq}) = \frac{\sigma_{eq}/\tau_a}{\sinh(\sigma_{eq}/\tau_a)}$, $\tau_a = \frac{RT}{v_a}$,

где $R = 8,314472 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ – универсальная газовая постоянная; ΔU_a – энергия активации; T_{ref} – отсчетная температура; T – температура испытания; v_a – активационный объем.

ΔU_a и v_a являются двумя дополнительными параметрами модели материала.

В модели Леонова-ЕГР напряжение текучести зависит от скорости и температуры. Оно определяется следующим образом:

$$\tau_y = \tau_0 \sinh(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0^*), \quad \dot{\epsilon}_0^* = \dot{\epsilon}_0 \exp(-\Delta U_a/RT), \quad (16)$$

где индекс «0» обозначает эталонное значение. Скорость деформации определяется из градиента деформации и производной правого тензора деформаций Коши-Грина по времени следующим образом:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} \mathbf{F}^{-T} \cdot \dot{\mathbf{C}} \cdot \mathbf{F}^{-1}. \quad (17)$$

Пластические деформации возникают только в том случае, если

$$(\sigma_s^d)_{eq} = \frac{\sigma_{eq}/\tau_a}{\sinh(\sigma_{eq}/\tau_a)} \text{ становится больше } \tau_y.$$

Результаты лабораторных испытаний ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления

Испытаниям предшествовал процесс изготовления лабораторных образцов. Лабораторные образцы были вырезаны из пластин, имеющих размеры в плане 180×180 мм и толщину от 1 до 1,25 мм в зависимости от направления нитей. Использовались стандартные плоские образцы, имеющие ширину рабочей части 10 мм и длину – 150 мм. Толщина образцов соответствовала толщине пластины. Пластины были напечатаны на 3D-принтере Wanhao 6 [5] из ABS-пластика ООО «РЭК» [6]. 3D-печать была осуществлена при следующих технологических параметрах: высота слоя 0,1 мм; плотность заполнения 100 %; скорость печати 50 мм/с; температура печати 230°C; температура стола 100°C; диаметр пластика 1,75 мм; поток пластика 100 %; диаметр сопла 0,4 мм.

При печати нити расплавленного пластика располагались параллельно диагоналям основания пластины, меняя направление на 90° от слоя к слою. Всего было изготовлено шесть лабораторных образцов. У двух образцов направление нитей нечетных слоев совпадало с продольной осью лабораторного образца, у двух лабораторных образцов отклонение составляло 22,5°, у двух – 45°. Результаты предварительных измерений размеров и масс лабораторных образцов представлены в табл. 1.

Испытания лабораторных образцов на растяжение были проведены на универсальной испытательной машине МИ-40КУ с числовым программным управлением. В процессе испытаний образцы доводились до разрушения.

Таблица 1

Характеристики лабораторных образцов

Номер образца	Направление нитей, град	Толщина рабочей части, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Масса, г
1	0	1,00	10,00	150,60	2,017
2	0	1,25	10,00	150,20	2,174
3	22,5	1,05	10,25	150,10	1,961
4	22,5	1,25	10,05	150,00	2,180
5	45	1,10	10,25	149,60	1,890
6	45	1,10	10,25	149,70	2,060

В процессе испытаний снималась диаграмма деформирования в координатах «нагрузка на образец – удлинение образца», по которой строилась диаграмма деформирования в координатах «напряжение – деформация». На рис. 2 приведены диаграммы деформирования шести лабораторных образцов.

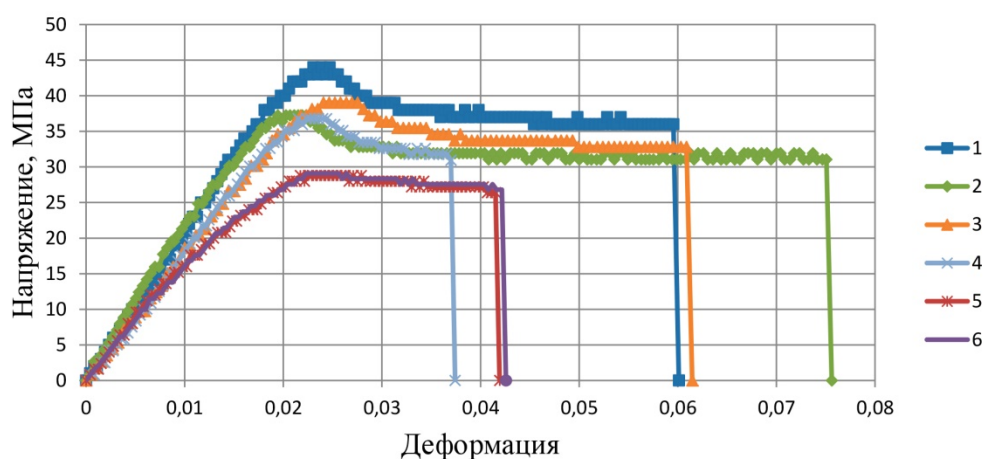


Рис. 2. Диаграммы деформирования: 1, 2 – направление нитей 0°; 3, 4 – направление нитей 22,5°; 5, 6 – направление нитей 45°

Анализ диаграмм деформирования позволил сделать следующие выводы:

- максимальные значения пика напряжений и тангенса угла наклона касательной к диаграмме деформирования на начальном участке имеют место при значении угла, характеризующего отклонение направления «нитей» от продольной оси лабораторного образца (угол α), равном нулю;
- при увеличении угла α значения пика напряжений и тангенса угла наклона касательной к диаграмме деформирования на начальном участке уменьшаются;
- при значениях угла α , равных 0 и 22,5°, имеет место значительный разброс деформации разрушения;
- при всех значениях угла α после первого пика напряжений на диаграмме деформирования проявляется разупрочнение с последующим упрочнением.

Параметры упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления

Упруго-вязкопластическая модель Леонова-EGP имеет 20 параметров. Эти параметры идентифицированы для случая растяжения образцов, при котором отклонение направления «нитей» от продольной оси лабораторного образца (угол α), был равен нулю, т.е. для случая наибольшего сопротивления образца деформированию.

Идентификация параметров модели Леонова-EGP осуществлялась в следующей последовательности.

Плотность материала определялась как отношение массы лабораторного образца, которая определялась взвешиванием на аналитических весах, к объему лабораторного образца. Объем образца определялся как произведение площади лабораторного образца к его толщине, которая измерялась микрометром.

Модуль Юнга определялся как тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат таким образом, чтобы минимизировать среднее квадратическое отклонение этой прямой от диаграмм деформирования. В рассматриваемом случае минимизировалось отклонение от двух диаграмм деформирования, для которых $\alpha = 0$.

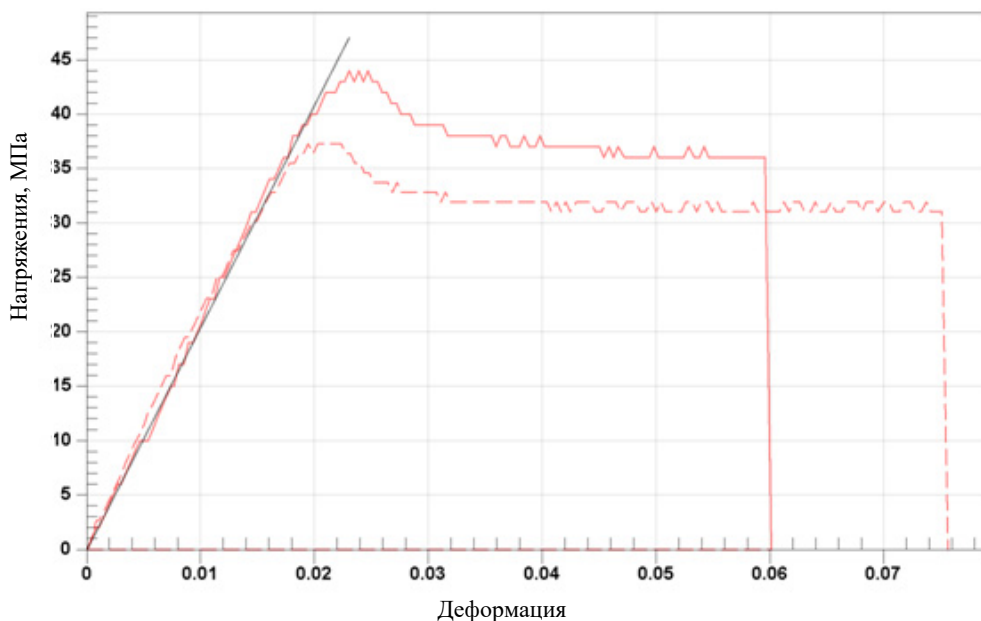


Рис. 3. Диаграммы деформирования: сплошная линия — результаты моделирования; точки — результаты эксперимента

Коэффициент Пуассона определялся экспериментально.

Идентификация других параметров упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP осуществлялась по критерию среднее квадратического отклонения диаграммы деформирования, построенной по результатам испытаний на растяжение, и диаграммы, построенной по результатам моделирования соответствующего процесса испытаний.

Идентификация параметров осуществлялась пошагово. На каждом шаге определялись значения двух параметров. После определения значений всех параметров процесс поиска повторялся до тех пор, пока результаты моделирования и эксперимента не показывали достаточную согласованность. Результаты идентификации представлены в табл. 2. Сопоставление диаграмм деформирования, представленных на рис. 3, позволяет оценить степень согласованности результатов моделирования и эксперимента при идентификации параметров модели Леонова-EGP для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при растяжении в направлении максимального сопротивления деформированию (при $\alpha = 0$).

Таблица 2

Результаты идентификации параметров модели

Наименование характеристики	Значение
Плотность ρ , кг/м ³	890
Модуль Юнга E , МПа	2038
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Характерное напряжение τ_0 , МПа	0,67
Отсчетная скорость деформации $\dot{\epsilon}_0$, с ⁻¹	$1,5 \cdot 10^{-28}$
Модуль упрочнения G_r , МПа	48
Коэффициент начальной вязкости $\eta_{0,r}$, МПа·с	$1,5 \cdot 10^{17}$
Коэффициент зависимости от давления μ_0	0,1
Первый коэффициент разупрочнения r_0	0,995
Второй коэффициент разупрочнения r_1	2000
Третий коэффициент разупрочнения r_2	-25
Первый временной коэффициент c_0	-5
Второй временной коэффициент c_1	4
Начальное время t_a , с	100
Отсчетное время t_0 , с	1
Энергия активации ΔU , 10^{-3} Дж·моль ⁻¹	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Активационный объем v_a , 10^9 м ³ ·моль ⁻¹	$1,5 \cdot 10^{-9}$
Универсальная газовая постоянная R , Дж·К ⁻¹ ·моль ⁻¹	8,31447
Отчетная температура T_{ref} , К	353
Температура испытаний T , К	300

Аналогично были идентифицированы параметры упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при растяжении в других направления приложении нагрузки (при $\alpha \neq 0$).

Сопоставление диаграмм деформирования, полученных экспериментально, с диаграммами деформирования, полученными в результате компьютерного моделирования, позволило сделать вывод о возможности использо-

вания упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для описания сопротивления деформированию ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при всех углах α . В том числе это касается и описания характерной особенности сопротивления растяжению ABS-пластика – происходящим после первого пика напряжений разупрочнением с последующим упрочнением вплоть до разрушения.

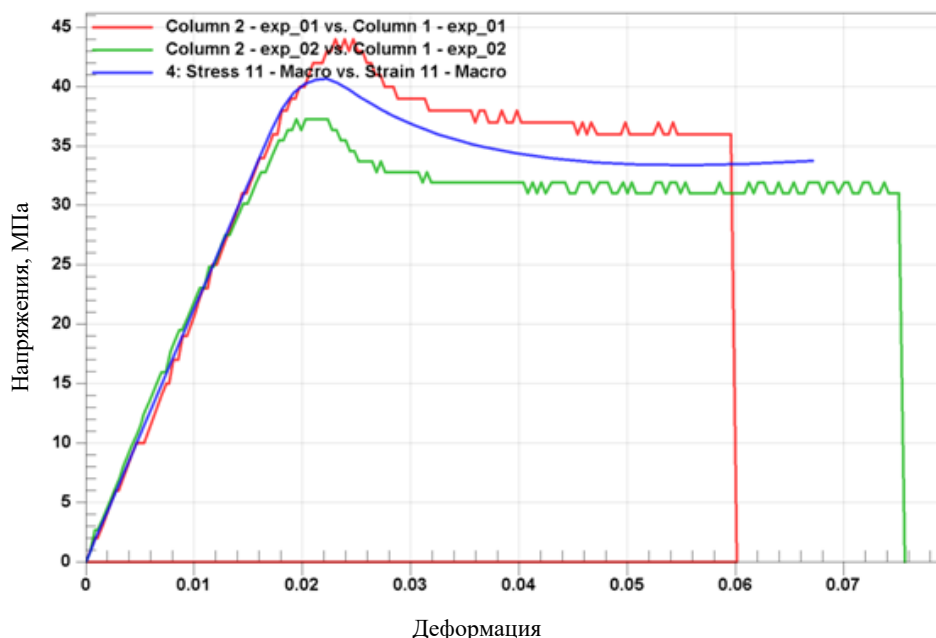


Рис. 4. Диаграммы деформирования: сплошная линия – результаты моделирования; точки – результаты эксперимента

Заключение

В работе исследовано сопротивление деформированию ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при различных углах ориентации «нитей» наплавленного пластика в слое. В результате исследования:

- выявлена характерная особенность сопротивления растяжению ABS-пластика – происходящее после первого пика напряжений разупрочнение с последующим упрочнением вплоть до разрушения. Эта особенность проявляется при углах $\alpha = 0$ и $22,5$;

- выявлена зависимость сопротивления деформированию ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, от угла α (угла ориентации «нитей» наплавленного пластика в слое);

- идентифицированы параметры упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при растяжении. Используемая в работе последовательность идентификации может быть использована при определении параметров упруго-вязкопластической модели Леонова-EG для других материалов.

Дальнейшими направлениями совершенствования описания сопротивления деформированию ABS-пластиков, полученных методом послойного наплавления, являются:

- использование ортотропных упругих, упругопластических или упруговязкопластических моделей;
- использование теории слоистых композитов, что позволит учесть значения углов укладки «нитей» расплавленного пластика в каждом слое;
- использование многоуровневых моделей, что позволит в более полной степени учесть действительную структуру детали из ABS-пластика, полученную методом послойного наплавления.

Библиографический список

1. <https://drive.google.com/file/d/0Bw-WWMWmJ3F0WXN2MElwSDZnVWc/view>
2. Leonov, A. I. Nonequilibrium thermodynamics and rheology of viscoelastic polymer melts / A. I. Leonov // Rheol. Acta. – 1976. – Vol. 15. – P. 85–98.
3. Leonov, A. I. Nonlinear Phenomena in Flows of Viscoelastic Polymer Fluids / A. I. Leonov, A. N. Prokunin. – New York : Chapman and Hall, 1994. – 297 p.
4. Leonov, A. I. Constitutive Equations for Viscoelastic Liquids: Formulation, Analysis and Comparison with Data / **Advances in the flow and rheology of nonnewtonian fluids, D. A. Siginer, D. De Kee and R.P. Chhabra Eds.,** Elsevier, New York, 1999. – P. 519–576.
5. <https://wanhaorus.ru/p329104877-printer-wanhao-duplicator.html>
6. <https://rec3d.ru/shop/plastik-dlya-3d-printerov/abs/abs-plastik-rec-1-75-naturalnyj>

Карташова Екатерина Дмитриевна
аспирант,
Пензенский государственный университет
E-mail: katrina89@yandex.ru

Kartashova Ekaterina Dmitryevna
postgraduate student,
Penza State University

Муйземнек Александр Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный университет
E-mail: muiyzemnek@yandex.ru

Muiyzemnek Alexander Yuryevich
doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University

УДК 621

Карташова, Е. Д.

Идентификация параметров модели abs-пластика, полученного методом послойного наплавления / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 130–140.

ВОЗМОЖНАЯ СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОБЩЕЙ ШИНЫ

А. И. Мартышкин

POSSIBLE STRUCTURAL ORGANIZATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF RECONFIGURABLE COMPUTING SYSTEMS BASED ON A COMMON BUS

A. I. Martyshkin

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современная технология оказала колоссальное влияние на структурную организацию реконфигурируемых вычислительных систем (в том числе и многопроцессорных). Переход от классической организации систем с разделяемой памятью к структурам с локальной памятью резко уменьшает интенсивность потока запросов к памяти и позволяет понизить требования к пропускной способности коммуникационной сети связи. Такой подход оказался плодотворным для реконфигурируемых систем с общей шиной, в которых способность к простому наращиванию числа процессоров ограничивается скоростью межпроцессорного обмена. Этим обусловлена актуальность статьи. Цель работы – рассмотрение вариантов возможной структурной организации и оценка производительности реконфигурируемых вычислительных систем на основе общей шины. *Материалы и методы.* Для достижения поставленных целей использованы методы теории массового обслуживания, а именно: разомкнутые сети массового обслуживания, средства, хорошо разработанные и описанные. *Результаты.* Разработаны и предложены выражения для оценки производительности реконфигурируемых вычислительных систем на основе общей шины. *Выводы.* Результатами исследования являются проанализированные варианты структурной организации, а также выражения для оценки производительности реконфигурируемых вычислительных систем.

Ключевые слова: реконфигурируемая вычислительная система, распределенная память, процессор, производительность, вычислительный модуль, конфликтная ситуация, межпроцессорный обмен, моделирование, система массового обслуживания.

Abstract. *Background.* Modern technology has a tremendous impact on the structural organization of reconfigurable computing systems (including multiprocessors). The transition from the classical organization of systems with shared memory to structures with local memory dramatically reduces the intensity of the flow of requests for memory and allows you to lower the requirements for the capacity of the communication network. This approach proved to be fruitful for reconfigurable systems with a common bus, in which the ability to simply increase the number of processors is limited by the speed of inter-processor exchange. This is due to the relevance of the article. *Materials and methods.* To achieve these goals used methods of theory of mass service, namely: open queueing networks, the tools are well designed and described. *Results.* Expressions have been developed and proposed for evaluating the performance of reconfigurable computing systems based on a common bus. *Conclusions.* The results of the study are analyzed options for structural organization, and expression to evaluate the performance reconfigurable computing.

Key words: reconfigurable computing system, distributed memory, CPU, performance, computing module, conflict situation, inter-processor exchange, modeling, Queuing system.

Введение

Современная технология оказала значительное влияние на структурную организацию многопроцессорных реконфигурируемых систем (МРС). Переход от классической организации многопроцессорных систем (МПС) с общей (разделяемой всеми процессорами) памятью (ОП) к структурам с локальной памятью (ЛП) резко уменьшает интенсивность потока запросов к ОП и позволяет понизить требования к пропускной способности межзвеновой сети связи. В частности, такой подход оказался плодотворным для МРС с общей шиной (ОШ), в которых способность к простому наращиванию процессоров ограничивается довольно низкой скоростью межпроцессорного обмена.

Постановка задачи

Рассмотрим основные варианты построения вычислительных систем с ОШ и ЛП. По способу организации памяти их можно разделить на структуры с объединенной ОП и ЛП и структуры с физической раздельной ОП и ЛП.

Структура МРС с объединенной ОП и ЛП показана на рис. 1. Система содержит n вычислительных модулей (ВМ), в каждом из которых имеется центральный процессор (ЦП) и ЛП, часть которой выделена под ОП, и коммутатор (К), необходимый для связи между ВМ. Управление ОШ может осуществляться арбитром.

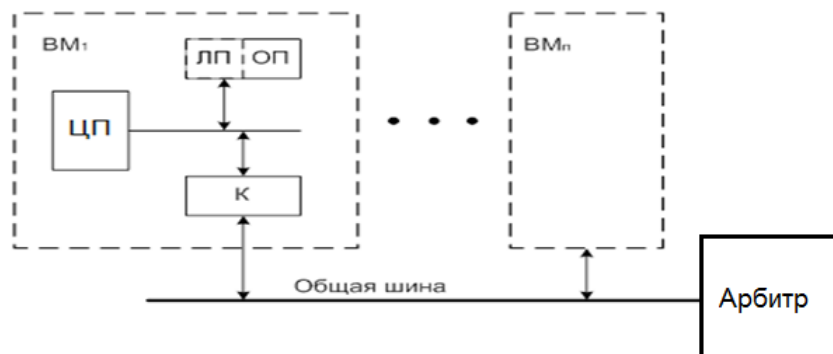


Рис. 1. Структура МРС с объединенной общей и локальной памятью

Известны два способа организации структур с физически раздельной ОП и ЛП. Первый способ – ОП размещена на внутренних шинах ВМ (рис. 2), второй – ОП размещена на ОШ (рис. 3).

Отмеченные способы организации МРС с ОШ различаются быстродействием. Структура, показанная на рис. 2, наиболее быстродействующая, т.к. в ней минимизированы конфликты, возникающие как в ОШ, так и в ОП. Однако затраты коммутационного оборудования и памяти в такой структуре наибольшие.

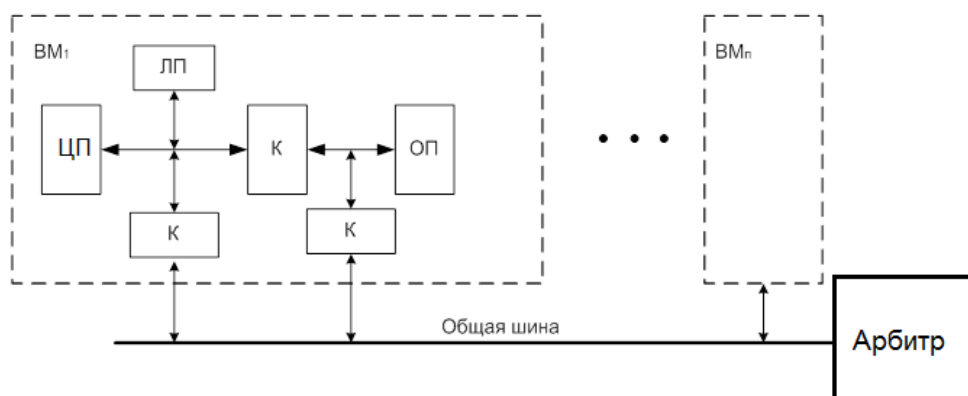


Рис. 2. MPC с общей памятью, размещенной на внутренних шинах VM

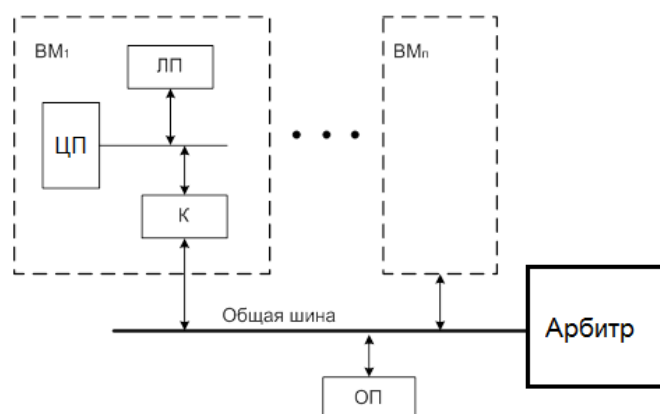


Рис. 3. MPC с общей памятью, размещенной на общей шине

Структура, показанная на рис. 3, имеет низкое быстродействие из-за большого числа конфликтных ситуаций, возникающих в ОП. Аппаратные затраты здесь наименьшие. Структура MPC с объединенной памятью (рис. 1) занимает промежуточное положение [1].

Связь между ЦП через ОШ может осуществляться двумя способами, отличающимися пропускной способностью и сложностью реализации: без буферизации и с буферизацией сообщений [2, 3]. В первом случае ОШ предоставляется i -му ЦП на все время выполнения команды обращения к ОП j -го VM. В противном случае ОШ предоставляется на значительно меньший промежуток времени, достаточный для обмена данными между буферными регистрами из состава коммутаторов. Этот способ более быстродействующий, но требует больших аппаратных затрат.

Разнообразие способов построения MPC с ОШ, значительно различающихся по аппаратным затратам и быстродействию, вызывает необходимость поиска оптимальной структуры для решения конкретной задачи. При выборе структуры для специализированных применений часто используется критерий получения заданной производительности при минимальных затратах оборудования. Производительность MPC с ОШ зависит от многочислен-

ных факторов и в том числе от конфликтов, возникающих в общих ресурсах (ОР). Одним из широко применяемых способов определения потерь производительности из-за возникающих конфликтов является аналитическое моделирование, которое при условии получения приемлемой по сложности и точности модели гложет стать хорошим инструментом на системном этапе проектирования.

Аналитическому моделированию МРС и МПС уделяется большое внимание, но существующие модели в основном предназначены для структур с ОП. При этом конфликты часто рассматриваются либо только в ОП, либо в ОШ [4, 5]. Имеются отдельные работы, где конфликты рассматриваются совместно [6–9]. Исследование структур с ЛП производится обычно без учета межпроцессорного взаимодействия. Для этого модель системы подразделяется на n систем массового обслуживания (СМО) (по числу ЦП в системе). Такое вводимое допущение хотя и значительно упрощает процесс моделирования, но приводит к большим погрешностям. Особенно это отражается на структурах с ОШ, в которых характеристики вычислительной системы сильно зависят от межпроцессорного обмена.

Рассмотрим подход к моделированию структур с ЛП, основанный на случайных процессах, описываемых разомкнутыми сетевыми моделями массового обслуживания, позволяющих учесть конфликты, возникающие как в памяти, так и в ОШ [4].

Математическая модель структуры МРС с объединенной общей и локальной памятью

МРС состоит из n ЦП, в каждом из которых есть ЛП, часть которой, доступная всем ЦП системы, определена как ОП. При межпроцессорном обмене ЦП запрашивает ОШ, доступ к которой производится с помощью коммутатора. Получив доступ к шине, ЦП-источник выставляет адреса, управляющие сигналы и данные для их записи в область (считывания из области) ОП ЦП-приемника. В течение времени обращения ЦП-приемник находится в режиме блокировки. При связи без буферизации сообщений как на запись, так и на чтение из ОП требуется один цикл ОШ, длительность которого не ограничивается. Завершение цикла производится с получением сигнала об окончании обслуживания. При связи с буферизацией сообщений на запись требуется один цикл, а на чтение – два цикла. ЦП одновременно, в течение цикла шины, потребовавшие доступ к занятой ОШ, переходят в режим ожидания. Все остальные работают автономно.

Для обращения в ЛП используются местные шины ВМ. Если ЦП, обращаясь к ЛП, обнаружит ее занятой со стороны ОШ, то он переходит в режим ожидания до освобождения памяти.

Рассмотрим математическую модель МРС, где для межпроцессорного обмена используется принцип связи без буферизации сообщений. Модель (рис. 4) на первой фазе обслуживания содержит ОШ (узел S_0), на второй – блоки памяти (узлы S_1 – S_n) [4]. Все составляющие сеть узлы одноканальные.

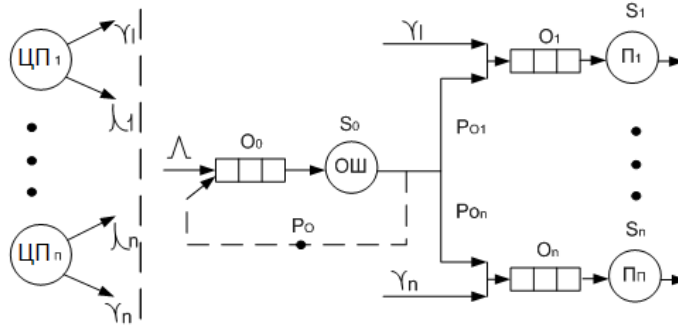


Рис. 4. Модель МРС со связью без буферизации сообщений

ЦП выдают заявки на обслуживание узлом S_0 с интенсивностью $\lambda_i = N_{\text{оп}i} / T$, где $N_{\text{оп}i}$ – число одноадресных команд обращения i -го ЦП в область ОП внешних по отношению к нему ВМ; T – время решения задачи. Заявка, заставшая узел S_0 занятым, становится в очередь. Дисциплина обслуживания на первой фазе – *FIFO*. Интенсивность потока на входе узла S_0 $\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$. Заявка, заставшая узел S_0 занятым, становится в очередь и ожидает до начала обслуживания. Обслуженная узлом S_0 заявка с вероятностью p_{0j}

поступает на обработку в j -й узел, причем $p_{0j} = N_{0j} / N$, где N_{0j} – число одноадресных команд обращения в j -й блок памяти; N – суммарное число команд обращения ко всем блокам памяти.

Интенсивность потока заявок во второй фазе $\alpha_j = p_{0j} \Lambda$, причем заявки из потока α_j , поступают на обслуживание с относительным приоритетом. Очередь $O_j (j = \overline{1, n})$ ограничена одним местом.

Поток команд i -го ЦП в i -й блок ЛП представляет собой поток заявок в узел $S_i (i = \overline{1, n})$ поступающий с интенсивностью $\gamma_i = N_{\text{лп}i} / T$, где $N_{\text{лп}i}$ – число одноадресных команд обращения i -го ЦП в ЛП.

Время выполнения команды обращения i -го ЦП к ОП внешнего по отношению к нему ВМ определится как сумма времени выполнения команды t_k без учета конфликтного простоя и времени задержки в сети. Время задержки в сети состоит из времени пребывания $T'_{\text{пр}}$ заявки в первой фазе обслуживания (узел S_0) и времени ожидания $T''_{\text{ож}}$ в очереди во второй фазе (один из узлов $S_1 - S_n$) $t_{\text{оп}i} = t_k + T'_{\text{пр}} + T''_{\text{ож}}$. Время выполнения команды обращения i -го ЦП в ЛП $t_{\text{лп}i} = t_k + \theta_{\text{ож}i}$ где $\theta_{\text{ож}i}$ – время ожидания заявки из потока γ в очереди к узлу $S_i (i = \overline{1, n})$.

Так как узел S_0 представляет собой СМО с одним обслуживающим прибором, то время пребывания заявки в нем составит

$$T'_{\text{ПР}} = \frac{\rho_0}{\Lambda(1-\rho_0)}, \quad (1)$$

где $\rho_0 = \Lambda t_0$ – загрузка узла S_0 (ОШ); t_0 – время обслуживания заявки узлом S_0 . При межпроцессорной связи без буферизации сообщений $t_0 = t_3 + t_{\text{памяти}}$, где t_3 – время занятия ОШ ЦП; $t_{\text{памяти}}$ – цикл памяти.

Так как заявки из потока α обслуживаются с относительным приоритетом по отношению к заявкам из потока γ , то время ожидания заявок из потока α во второй фазе равно остаточному времени обслуживания заявок из потока γ .

$$T_{\text{ОЖ}\gamma} = \frac{\gamma_j t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2}, \quad (2)$$

где $t_{\text{памяти}}^{(2)}$ – второй момент времени обслуживания блоком памяти.

Учитывая, что t_k и $T'_{\text{ПР}}$ ($T'_{\text{ПР}} = T'_{\text{ОЖ}} + t_3 + t_{\text{памяти}}$) одновременно содержат в себе $t_{\text{памяти}}$, то время выполнения операции обмена с ОП определится как

$$t_{\text{ОП}} = t_k - t_{\text{памяти}} + \frac{\rho_0}{\Lambda(1-\rho_0)} + \frac{\gamma_j t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2}. \quad (3)$$

В симметричном случае, когда МРС, состоящая из n ЦП, решает одну задачу, распараллеленную на n идентичных подзадач, то $\lambda_i = \lambda$, $\gamma_i = \gamma$ поэтому

$$t_{\text{ОП}} = t_k - t_{\text{памяти}} + \frac{\rho_0}{\Lambda(1-\rho_0)} + \frac{\gamma t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2}. \quad (4)$$

Поток заявок γ имеет более низкий приоритет по отношению к заявкам из потока α . В выражение для вычисления времени ожидания в очереди заявок из этого потока входит две составляющие. Первая – остаточное время обслуживания заявок из потока α . Вторая – время ожидания за счет обслуживания заявок из потока α , поступивших в течение времени ожидания заявок из потока γ

$$\theta_{oi} = \theta_{oi} + \alpha_i \theta_{\text{ОЖ}i} t_{\text{памяти}}, \quad (5)$$

где θ_{oi} – остаточное время обслуживания заявок из потока α .

$$\theta_{oi} = \frac{\alpha_i t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) и решая относительно $\theta_{\text{ОЖ}i}$, получим

$$\theta_{\text{ОЖ}i} = \frac{\alpha_i t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2(1-\alpha_i t_{\text{памяти}})}. \quad (7)$$

Время выполнения команды обращения в ЛП определится как

$$t_{\text{ЛП}} = t_k + \frac{\alpha_i t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2(1 - \alpha_i t_{\text{памяти}})} . \quad (8)$$

Для симметричного случая

$$t_{\text{ЛП}} = t_k + \frac{\alpha t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2(1 - \alpha t_{\text{памяти}})} . \quad (9)$$

МРС, использующая связь с буферизацией, отличается наличием буферных регистров в интерфейсе ОШ-память. Хотя в общем случае буферных регистров (число мест в очереди O_j) может быть K , однако будем рассматривать структуры с одним буферным регистром ($K = 2$), что является наиболее типичным для реально существующих систем. В такой МРС время обслуживания ОШ состоит из времени занятия ОШ и времени обращения к буферному регистру $t_0 = t_z + t_{\text{бр}}$.

Заявка из потока α , застигнувшая узел S_j занятым обслуживанием предыдущей заявки из того же потока, приостанавливается и возвращается в конец очереди S_0 . Обозначим вероятность приостановки узлом S_j ; через p_{j0} , тогда вероятность приостановки обслуживания, создаваемая узлами $S_1 - S_n$ $p_0 = \sum_{j=1}^n p_{j0}$. Связь, показывающая возможность передачи заявок с выхода на вход узла S_0 при приостановках изображена на рис. 4 пунктирной линией. Следует отметить и учесть, что суммарный поток заявок в узле S_0 не увеличивается, т.к. ЦП не выдает следующей заявки, пока предыдущая не будет обслужена. Поэтому дополнительная задержка, связанная с приостановками, может быть определена через вероятность приостановки p_0 и среднее время пребывания заявки в узле S_0

$$W = p_0 T'_{\text{ПР}} . \quad (10)$$

Вероятность приостановки p_{j0} есть вероятность того, что одноступенчатая очередь перед узлом S_j занята обслуживанием ранее поступившей заявки из потока α или γ

$$p_{j0} = \rho_j^2 (1 - \rho_j) , \quad (11)$$

где $\rho_j = (\alpha_j + \gamma_j) t_{\text{ЦП}}$.

Тогда

$$p_0 = \sum_{j=1}^n \rho_j^2 (1 - \rho_j) . \quad (12)$$

Подставив (12) в (10) и заменив $T'_{\text{ПР}}$ в соответствии с выражением (1), получим

$$W = \frac{\rho_0}{\Lambda(1-\rho_0)} \left[\sum_{j=1}^n \rho_j^2 (1-\rho_j) \right]. \quad (13)$$

Время выполнения операции обмена i -го ЦП с ОП

$$t_{\text{ОП}i} = t_k + T'_{\text{ПР}} + T''_{\text{ОЖ}} + W. \quad (14)$$

Поставив в (14) выражения для $T'_{\text{ПР}}$, $T''_{\text{ОЖ}}$ и W , получим

$$t_{\text{ОП}i} = t_k + \frac{\rho_0}{\Lambda(1-\rho_0)} \left[1 + \sum_{j=1}^n \rho_j^2 (1-\rho_j) \right] + \frac{\gamma_j t_{\text{памяти}}^{(2)}}{2}. \quad (15)$$

Математическая модель структуры с физически раздельной общей и локальной памятью

Рассмотрим вначале структуру, где блоки ОП размещены на внутренних шинах ВМ, а межмодульная связь производится без буферизации. Число конфликтных ситуаций в ОП здесь меньше, чем в структуре с объединенной ОП и ЛП. Это обусловлено тем, что при обращениях i -го ЦП в ЛП не создается помех для заявок, поступивших из других ЦП на обслуживание i -м блоком ОП.

Отличие математической модели такой структуры от вышерассмотренной модели в том, что интенсивность потока γ_i будет определяться только числом команд обращения i -го ЦП к i -му блоку ОП $N_{\text{ОП}i}$, т.е. $\gamma_i = N_{\text{ОП}i} / T$. Если этот поток мал, то конфликтами в ОП можно пренебречь. Тогда модель упрощается и сводится к одноузловой с обслуживающим устройством S_0 . Время выполнения операции обращения к ОП будет состоять из времени t_k и времени ожидания в очереди к узлу S_0

$$t_{\text{ОП}i} = t_k - t_{\text{ЦП}} + \frac{\rho_0}{\Lambda(1-\rho_0)}. \quad (16)$$

Время пребывания заявок в узле S_0 в данном случае можно определить более точно (с меньшей погрешностью), используя модель системы типа $M/M/I/n$ с конечным числом источников заявок (ЦП) n . Тогда среднее число заявок в системе

$$L_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=0}^n k \rho^k \frac{n!}{(n-k)!}}{\sum_{k=0}^n \rho^k \frac{n!}{(n-k)!}}. \quad (17)$$

Применяя формулу Литтла [4, 5], получим

$$T_{\text{ПР}} = \frac{\sum_{k=0}^n k \rho^k \frac{n!}{(n-k)!}}{\lambda \sum_{k=0}^n \rho^k \frac{n!}{(n-k)!}}. \quad (18)$$

Отсюда

$$t_{\text{ОП}} = t_k - t_{\text{памяти}} + \frac{\sum_{k=0}^n k \rho^k \frac{n!}{(n-k)!}}{\lambda \sum_{k=0}^n \rho^k \frac{n!}{(n-k)!}}. \quad (19)$$

В МПС, использующей связь с буферизацией, возможны конфликты как при обращениях к ОШ, так и к ОП. Модель системы аналогична ранее рассмотренной модели с объединенной ОП и ЛП с тем же способом межмодульной связи. Отличие лишь в том, что поток заявок γ_i в i -ю ОП сократится из-за того, что ОП физически отделена от ЛП. Если этим потоком пренебречь (на рис. 4 полностью исключить потоки $\gamma_1 - \gamma_n$), то предлагаемая модель несколько упрощается.

Если общая память размещается на ОШ (рис. 3), то исследование такой модели как правило сводится к анализу одноканальной СМО.

Производительность МПС определяется способностью алгоритма распараллеливаться. Также на нее влияют управляющие программы, программы межпроцессорного обмена и конфликты, возникающие в ОР. Оценить производительность можно коэффициентом использования производительности i -го ЦП, входящего в состав системы

$$\eta_i = 1 - (u_i + e_i + \pi_i + k_i), \quad (20)$$

где $u_i = T_{yi} / T_{i\max}$, $e_i = T_{0i} / T_{i\max}$, $\pi_i = T_{ni} / T_{i\max}$, $k_i = T_{КПи} / T_{i\max}$, соответственно коэффициенты потерь из-за работы управляющих программ, программ межпроцессорного обмена, последовательных участков программ и конфликтного простоя i -го ЦП; $T_{i\max}$ – время выполнения наиболее длительной программы, обрабатываемой i -м ЦП.

$$T_{i\max} = \max \{ T_{счi} + T_{yi} + T_{ni} + T_{0i} + T_{КПи} \}, \quad (21)$$

где $T_{счi}$ – время выполнения программы i -м ЦП без учета непроизводительных затрат.

Производительность МРС можно рассчитать по выражению $P^* = P \sum_{i=1}^n \eta_i$, где P – производительность одного ЦП.

Заключение

В статье исследована структурная организация и проведена оценка производительности многопроцессорных реконфигурируемых систем на основе общей шины, получены аналитические модели, основанные на разомкнутых сетях массового обслуживания, приведены выражения для оценки производительности многопроцессорных вычислительных систем с общей шиной. Подробно расписаны выражения для расчета моделей реконфигурируемой системы, в которых для межпроцессорного обмена используется

принцип связи без буферизации сообщений. Показанные в работе модели и выражения позволяют производить оценку характеристик системы без построения реальных дорогостоящих функциональных макетов.

Библиографический список

1. Цилькер, Б. Я. Организация ЭВМ и систем / Б. Я. Цилькер, С. А. Орлов ; 2-е изд. – СПб. : Питер, 2011. – 688 с.
2. Мартышкин, А. И. Исследование подсистем памяти с буферизацией транзакций на моделях массового обслуживания / А. И. Мартышкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2011. – № 3. – С. 124–131.
3. Майоров, С. А. Основы теории вычислительных систем: учеб. пособие / С. А. Майоров, Г. И. Новиков, Т. И. Алиев, и др. ; под ред. С. А. Майорова. – М. : Высш. шк., 1978. – 408 с.
4. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок ; пер. с англ. – М. : Мир, 1979. – 600 с.
5. Богуславский, Л. Б. Вероятностные методы и модели управления потоками данных и ресурсами в сетях и многопроцессорных системах : автореф. дис. ... д-р. техн. наук. / Богуславский Л. Б. – М. : Институт проблем управления, 1995. – 38 с.
6. Мартышкин, А. И. К вопросу оценки времени обслуживания транзакций при обмене данными в многопроцессорных системах на основе общей шины с разделяемой памятью / А. И. Мартышкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 56. – С. 90–98.
7. Мартышкин, А. И. Разработка и исследование математических моделей подсистемы «процессор-память» многопроцессорных вычислительных систем архитектур NUMA и SUMA на разомкнутых сетях массового обслуживания / А. И. Мартышкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 55. – С. 55–63.
8. Martyshkin, A. I. Development and research of open-loop models the subsystem «Processor-memory» of Multiprocessor systems architectures UMA, NUMA and SUMA / A. I. Martyshkin // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 23. – P. 13526–13535.
9. Алиев, Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.

Мартышкин Алексей Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра вычислительных машин и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
E-mail: alexey314@yandex.ru

Martyshkin Aleksey Ivanovich

candidate of technical sciences, associate
professor, sub-department of computers and
systems,
Penza State Technological University

УДК 519.872.2, 519.872.5

Мартышкин, А. И.

Возможная структурная организация и оценка производительности реконфигурируемых вычислительных систем на основе общей шины / А. И. Мартышкин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 141–150.

**КОМПЕНСАЦИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ
ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧИ НА ОСНОВЕ
РЕДУЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

В. Д. Мостовой, В. П. Бирюков

**COMPENSATION OF INTERRELATION
OF CONTROL CIRCUITS OF CROSS AND LONGITUDINAL
GIVING ON THE BASIS OF THE REDUCED MODEL
OF TURNING PROCESSING**

V. D. Mostovoy, V. P. Biryukov

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сложность, изменение закономерностей процессов резания, невозможность контроля параметров в процессе металлообработки затрудняют создание эффективных систем управления непосредственно качественными показателями обрабатываемых изделий, что привело к созданию большого количества систем стабилизации отдельных режимных параметров процессов резания и возмущающих воздействий. Отработка такими системами ограниченного количества возмущающих воздействий приводит к необходимости применения нескольких контуров управления. Однако, наличие взаимосвязи контуров через объект управления снижает эффективность или приводит к невозможности их совместной работы. Цель данной работы – исследовать возможность обеспечения совместной работы системы стабилизации силы резания, компенсирующей влияния изменения припуска, характеристик материала заготовки, износа инструмента, и системы обработки нежестких валов по траектории предсказания, компенсирующей изменение жесткости упругой системы заготовки в процессе точения, взаимосвязанных через объект управления, что приводит к неустойчивости работы систем и возникновению автоколебаний, путем построения динамического компенсатора для развязки каналов на основе упрощенной методики синтеза компенсирующих звеньев с использованием аппроксимационного подхода. *Материалы и методы.* Решение данной задачи достигнуто путем построения на основе теории инвариантности и аппроксимационного подхода вторых каналов передачи информации, компенсирующих взаимную передачу сигналов с одного контура на другой вследствие их взаимосвязи через объект управления. *Результаты.* В работе произведен динамический синтез системы управления силой резания путем корректировки продольной подачи и следящей системы отработки режущей кромкой резца траектории предсказания, задаваемой системой управления верхнего уровня. Методом математического моделирования показана невозможность нахождения параметров управляющих устройств, обеспечивающих их совместную устойчивую работу при наличии взаимосвязи контуров через объект управления, на основании теории инвариантности методом аппроксимации сложных динамических систем системами пониженного порядка построены корректирующие звенья, обеспечивающие развязку каналов управления по продольной и поперечной подаче. *Выводы.* Результаты математического моделирования показали возможность эффективной работы систем управления силой резания и продольным профилем обрабатываемого изделия при компенсации взаимосвязи систем через объект управления.

Ключевые слова: процессы резания, адаптивные системы, взаимосвязанные системы, математическое моделирование, динамические характеристики, теория инвариантности, квадратичное приближение.

Abstract. Background. Complexity, changes in the regularities of cutting processes, inability to control quality in the process: automation of processes controlling technological processes and removing impacts. The development of such systems of a limited number of disturbing effects leads to the need for several control loops. However, the presence of the relationship of contours through the object of management of efficiency or results to the impossibility of their joint work. The purpose of this work is to investigate the possibility of ensuring the joint operation of the cutting force stabilization system, compensating for the effect of changes in the allowance, the characteristics of the workpiece material, tool wear, and the system for processing non-rigid rolls along the pre-distortion path compensating for the change in the rigidity of the elastic system of the workpiece during turning, interconnected through the control object, which leads to instability of the operation of the systems and the appearance of self-oscillations, by constructing a dynamic compensator for the decoupling of the channel in based on a simplified methodology for the synthesis of compensating links using the approximation approach. **Materials and methods.** The solution of this problem is achieved by constructing, on the basis of invariance theory, second information transmission channels that compensate for the mutual transmission of signals from one circuit to another due to their interrelation through the control object. **Results.** In this work, a dynamic synthesis of the cutting force control system is made by adjusting the longitudinal feed and tracking system of the cutting edge of the pre-distortion trajectory cutter set by the upper level control system. The method of mathematical modeling shows the impossibility of finding the parameters of control devices that ensure their joint stable operation in the presence of interconnection of contours through the control object, based on the theory of invariance by the method of approximation of complex dynamical systems by systems of reduced order, correcting links are created ensuring the isolation of the control channels along the longitudinal and transverse feed. **Conclusions.** The results of mathematical modeling showed the possibility of effective operation of the cutting force control systems and the longitudinal profile of the workpiece when compensating the interconnection of systems through the control object.

Key words: turning process, adaptive systems, interrelated systems, mathematical modeling, dynamic properties, invariance theory, quadratic approximation.

Введение

Применение в металлообработке станков с ЧПУ приводит к существенному повышению производительности и снижению количества брака. Однако возникающие в процессе металлообработки случайные изменения силовых параметров резания при изменении припуска, характеристик срезаемого слоя, износе инструмента, и т.д. приводят к дополнительным деформациям упругих систем заготовки и инструмента и дополнительным погрешностям обработки. Это приводит к необходимости ограничивать режимные параметры обработки в пределах, гарантирующих получение требуемой точности обработки при наличии данных возмущений, что снижает эффективность использования современного дорогостоящего металлообрабатывающего оборудования.

Эффективным методом решения проблемы влияния случайных факторов является создание систем адаптивного управления АдСУ, учитывающих изменение параметров технологического процесса непосредственно в процессе обработки [1–6]. Даже при использовании современных токарных станков ведущих фирм производителей, позволяющих достигать точности обра-

ботки до единиц микрон, данный подход является единственным, обеспечивающим компенсацию влияния изменения силовых воздействий при колебаниях припуска, характеристик материала, износе инструмента и влиянии других неконтролируемых возмущающих воздействий. Особое значение автоматизированные системы управления имеют при обработке нежестких валов, компенсируя деформации смещения задней и передней бабок и изгиба заготовки и обеспечивая высокую точность обработки без снижения производительности [2–6].

Существующая мировая практика показывает, что современные системы числового программного управления металлорежущими станками позволяют внедрять АдСУ программными методами. Примером являются системы управления типа ACM OMATIVE, работающие с CNC SINUMERIK на станках от фирмы DMG MORI по ПИ, ПИД и другим законам регулирования [7]. Это позволяет реализовать системы адаптивного управления в качестве надстройки над системами ЧПУ станка.

Однако сложность, нелинейность, изменение закономерностей процессов резания, невозможность контроля параметров в процессе обработки не позволяют создавать эффективные системы управления непосредственно качественными показателями обрабатываемых изделий, что привело к созданию большого количества систем стабилизации отдельных режимных параметров и возмущающих воздействий [1–6]. Отработка такими системами ограниченного количества возмущающих воздействий приводит к необходимости применения нескольких контуров управления [3–6, 8], что при наличии взаимосвязи параметров через объект управления снижает эффективность или приводит к невозможности их совместной работы.

В данной работе рассматривается задача обеспечения совместной работы системы обработки нежестких валов по траекториям предсказания для компенсации изменения жесткости упругой системы заготовки в процессе точения и системы стабилизации силы резания для компенсации влияния изменения припуска, характеристик материала заготовки, износа инструмента и других возмущающих воздействий.

Исходная двухконтурная взаимосвязанная система управления процессом токарной обработки

На рис. 1 представлена функциональная схема рассматриваемой двухконтурной системы управления процессом токарной обработки: 1 – передняя бабка; 2 – задняя бабка; 3 – обрабатываемый нежесткий вал; 4 – суппорт; 5 – резец.

Система включает два контура управления с отрицательной обратной связью. Первый контур производит стабилизацию силы резания путем корректировки продольной подачи. Он включает датчик силы резания P_z , аналого-цифровой преобразователь АЦП1, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор $Reg1$, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП1, электронный усилитель ЭУ1, двигатель продольной подачи, редуктор, шарико-винтовую пару (ЭД1, Ред1, ШВП1) и процесс резания как объект управления по каналу продольная подача – сила резания.

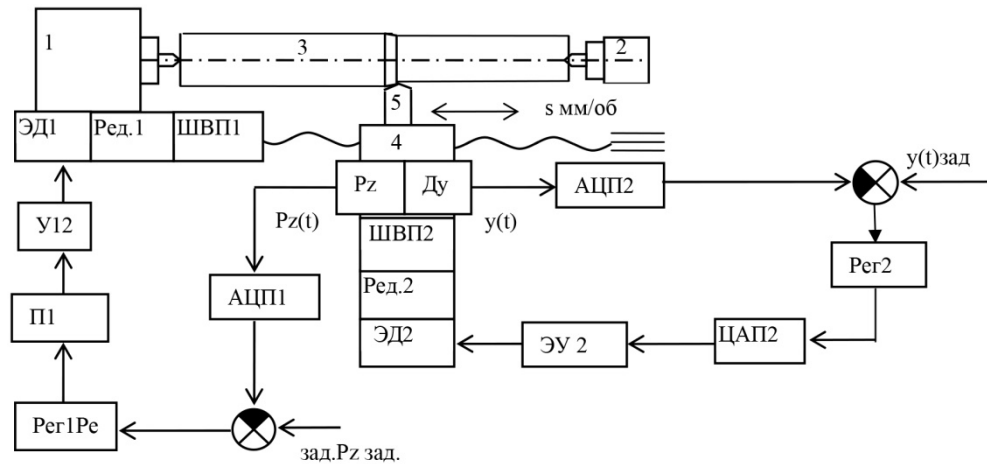


Рис. 1. Функциональная схема двухконтурной системы управления процессом токарной обработки нежестких деталей

Второй контур производит управление положением резца по поперечной оси. Он включает датчик положения суппорта по поперечной оси D_y , аналого-цифровой преобразователь АЦП2, ПИД регулятор $Per2$, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП2, электронный усилитель ЭУ2, электрический двигатель, редуктор, шарико-винтовую пару (ЭД2, РЕД2, ШВП2). Данный контур является следящей системой и обрабатывает заданную траекторию предсказания $y(t)_{\text{зад}}$, задаваемую верхним контуром системы управления по математической модели деформации заготовки в процессе резания с корректировкой траектории по отклонению профиля заготовки от заданного [3, 5].

Математические модели элементов данной системы управления, включая модели объектов управления, определены на основании паспортных данных элементов, ранних работ авторов [2], работ [3-6] и приведены на структурной схеме (рис. 2).

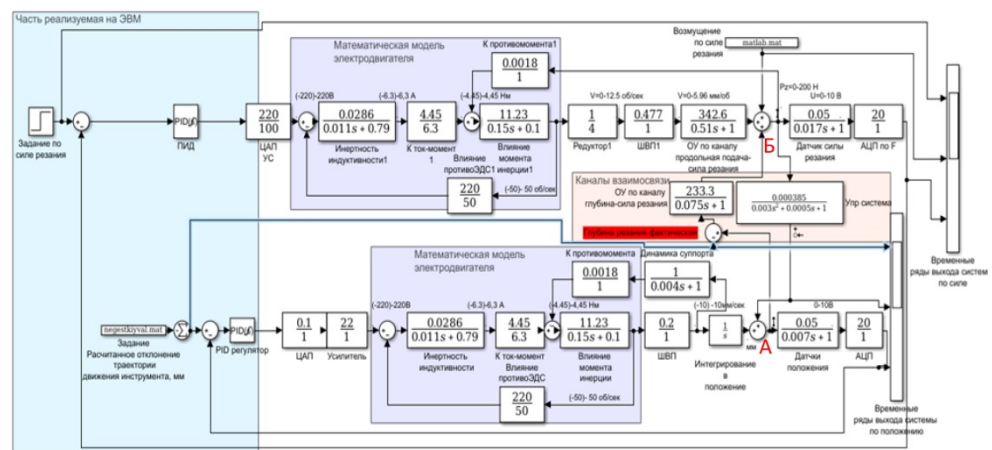


Рис. 2. Структурная схема двухконтурной системы управления с учетом взаимосвязи контуров двухконтурной системы управления в Simulink

На данной схеме дополнительно к системе, приведенной на рис. 1, показаны динамические элементы взаимосвязи контуров через объект управления. Динамическое звено второго порядка:

$$W(p) = \frac{0,000385}{0,003p^2 + 0,0005p + 1}$$

отображает влияние изменения силы резания на упругие системы заготовки и инструмента и положение режущего инструмента по поперечной оси для токарно-винторезного станка 16К20 [3–6].

Динамическое звено:

$$W(p) = \frac{233,3}{0,075p + 1} \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}} \right]$$

отображает влияние изменения глубины резания на изменение силы резания. Структура и параметры данного элемента определялись на основании результатов активного эксперимента.

Введенные элементы взаимосвязи показывают влияние систем друг на друга с учетом их упругих свойств. При работе регулятора силы резания управляющее воздействие данного регулятора из точки «а» (рис. 3) через звенья прямого канала первой системы W_1 и динамическое звено связи W_3 приходит в точку «d» второй системы и тем самым генерирует возмущающее воздействие на вторую систему. Аналогично управляющее воздействие второго контура из точки «с» через звенья прямого канала данного контура W_2 и звено динамической связи W_4 приходит в точку «b» первой системы и генерирует возмущающее воздействие на объект управления силой резания. Данные сигналы через датчики, аналого-цифровые преобразователи, регуляторы вновь поступают в начальные точки контуров управления, создавая колебательные контура и ухудшая качественные показатели работы системы управления.

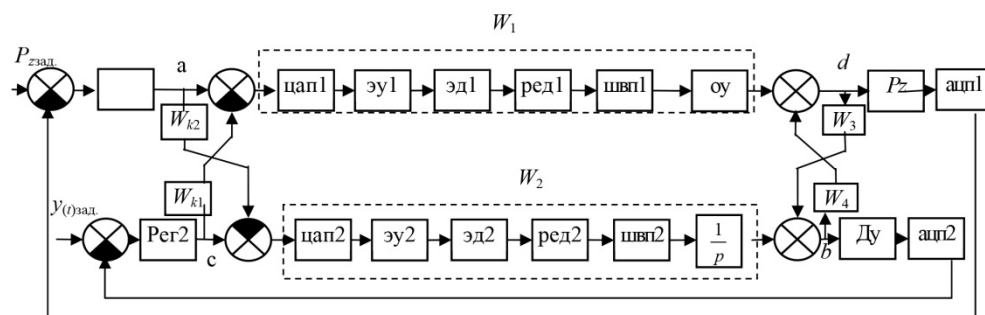


Рис. 3. Структурная схема двухконтурной системы управления с компенсацией

Моделирование контуров данной системы без учета взаимосвязей показало их работоспособность, устойчивость и достаточные качественные показатели. Моделирование системы с учетом взаимосвязей практически показало невозможность получения устойчивых режимов. При подаче ступенчатого задающего воздействия по силе резания рис. 4,а и стохастического возмуща-

ющего воздействия рис. 4,б не удалось найти параметры регуляторов (поиск при помощи функции PID Tuner в Simulink), обеспечивающие устойчивую работу контуров управления. На рис. 4,в представлен расходящийся процесс по силе резания, на рис. 4,е расходящийся процесс по положению резца на поперечной оси причиной которого является возмущающее воздействие на данную систему от колебаний силы резания рис. 4,д.

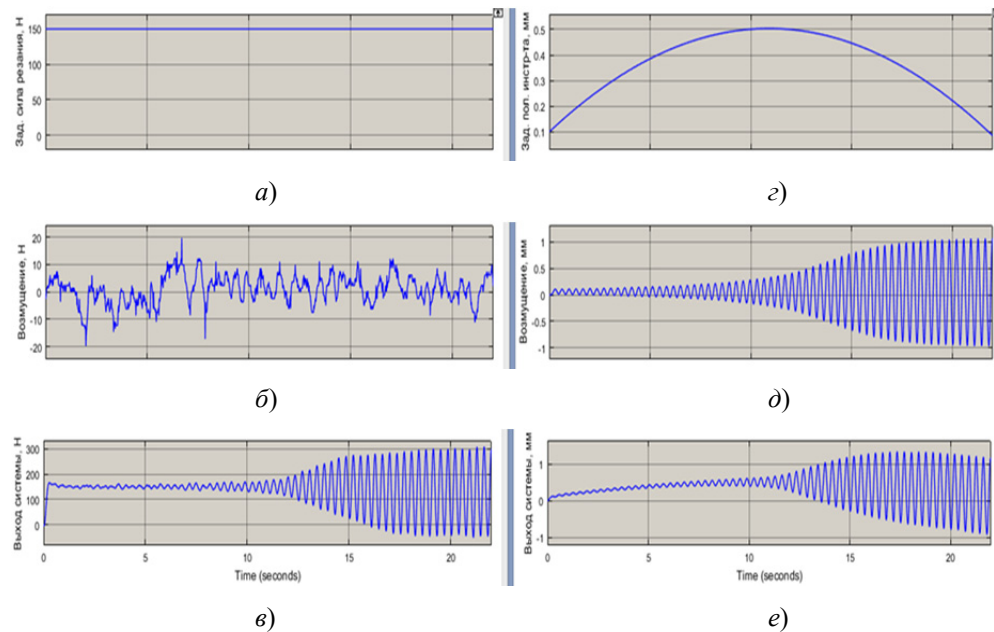


Рис. 4. Предварительные результаты моделирования разрабатываемой системы управления в Simulink

Этапы решения задачи компенсации взаимосвязи контуров управления силой резания и продольным профилем обрабатываемой детали

Для обеспечения работоспособности системы необходимо устранить взаимную генерацию возмущающих воздействий контуров друг на друга. На основании теории инвариантности для устранения данных взаимных возмущений введены компенсационные динамические звенья W_{k1} и W_{k2} , через которые образуются вторые каналы, обеспечивающие приход в точки d и b рис. 3 сигналов от управляющих воздействий Рег. 1 и Рег. 2, равных указанным возмущениям в данных точках, но с противоположными знаками. Функциональная схема системы с взаимной компенсацией представлена на рис. 5.

Система 2 при наличии взаимосвязи W_3 становится инвариантной к выходному сигналу системы 1 при выполнении условия

$$W_1 W_3 = W_{k2} W_2.$$

Отсюда передаточная функция звена компенсации управляющего воздействия второго контура будет равна

$$W_{k2} = \frac{W_1 W_3}{W_2}.$$

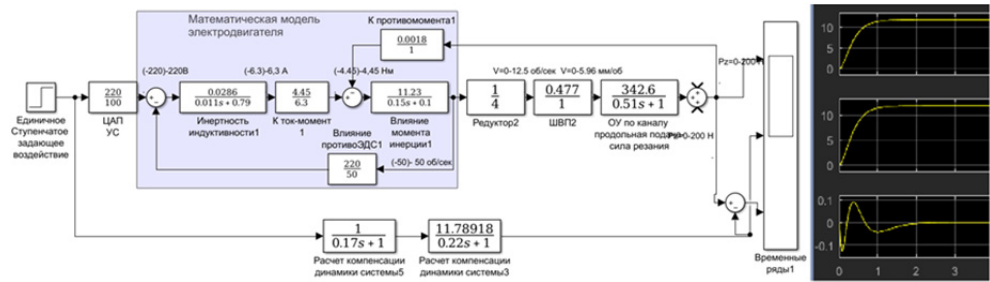


Рис. 6. Программа определения параметров W_1

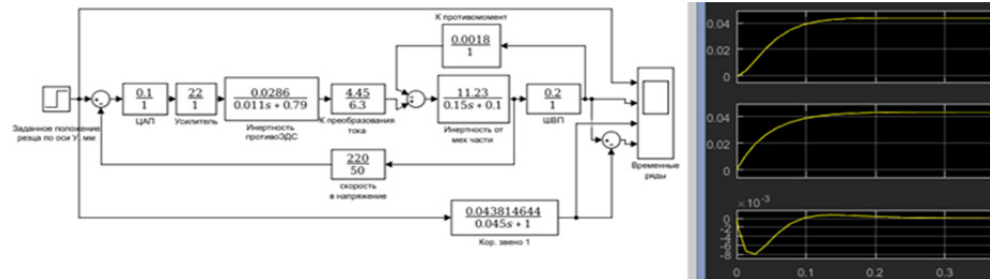


Рис. 7. Программа определения параметров W_2

На втором этапе методом нелинейного программирования находились аппроксимации обратных функций W_1^{-1} и W_2^{-1} . Структурные схемы решения данной задачи приведены на рис. 8 и 9.

При этом на динамическую систему W подавался единичный ступенчатый сигнал и фиксировалась его реакция. Данный сигнал подавался на интегро-дифференцирующее звено

$$\frac{1}{W} = \frac{(Tp+1)}{(Tp+1)} \cdot \frac{(Tp+1)}{(Tp+1)}.$$

Методом нелинейного программирования подбирались такие параметры данного звена, чтобы его выходной сигнал по квадратичному критерию приближался к единичному входному сигналу, подаваемому на вход W_1 (нижние графики на рис. 8, 9). В качестве начального приближения данного звена использовалась обратная передаточная функция звена W_1 , в которую для выполнения условия физической реализуемости в знаменатель добавлялись множители $(Tp+1)$ с малыми постоянными времени.

При этом получены следующие модели аппроксимации обратных звеньев

$$W_1 \approx \frac{1}{11,79} \cdot \frac{0,17p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{0,22p+1}{0,001p+1},$$

$$W_2 \approx \frac{1}{0,0438} \cdot \frac{0,045p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{dy}{dt}.$$

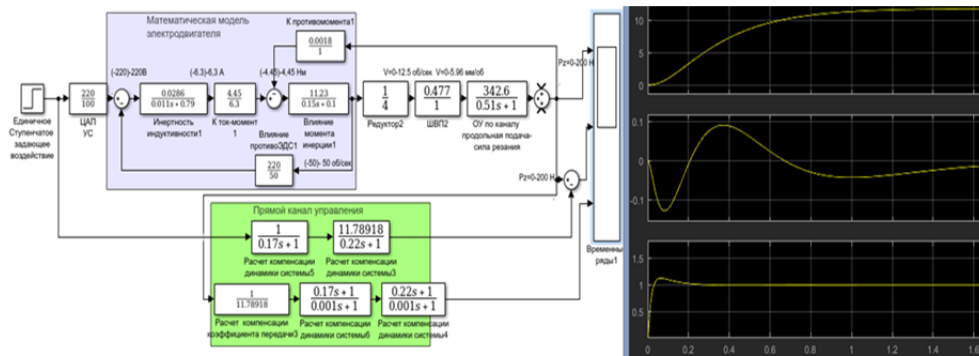


Рис. 8. Программа определения параметров W_1^{-1}

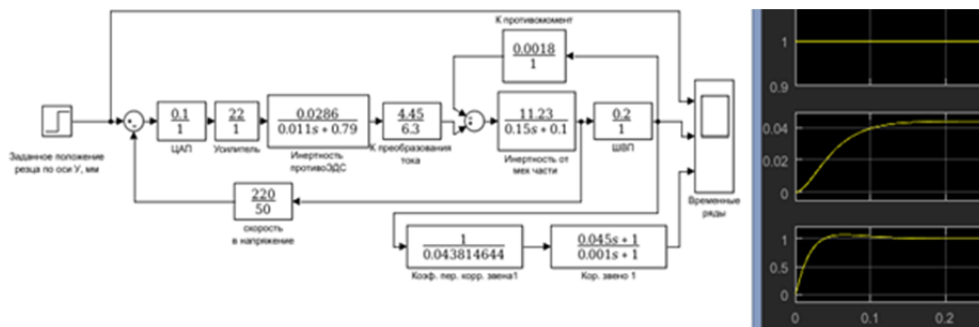


Рис. 9. Программа определения параметров W_2^{-1}

Полученные аппроксимации W_1 , W_2^{-1} и модель взаимосвязи W_3 позволяют получить уравнения компенсирующего звена второй системы

$$W_{k2} \approx \frac{11,79}{0,17p+1} \cdot \frac{1}{0,22p+1} \cdot \frac{0,000385}{0,003p^2+0,0005p+1} \cdot \frac{1}{0,0438} \cdot \frac{0,045p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{dy}{dt}.$$

Аналогично полученные аппроксимации W_2 , W_1^{-1} и модель взаимосвязи W_4 позволяют получить уравнения компенсирующего звена первой системы

$$W_{k1} \approx \frac{0,0438}{0,045p+1} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{233,3}{0,075p+1} \cdot \frac{1}{11,79} \cdot \frac{0,17p+1}{0,001p+1} \cdot \frac{0,22p+1}{0,001p+1}.$$

Полная структурная схема двухконтурной системы управления процессом токарной обработкой с компенсацией динамических каналов связи приведена на рис. 10.

Этапы исследования двухконтурной системы управления с компенсацией взаимосвязи контуров через объект управления

С целью анализа работоспособности и определения параметров качества рассматриваемой системы управления выполнены следующие этапы работ.

1. Произведена настройка ПИД регуляторов для контуров управления силой резания и положением режущего инструмента по поперечной оси без учета взаимосвязи контуров.

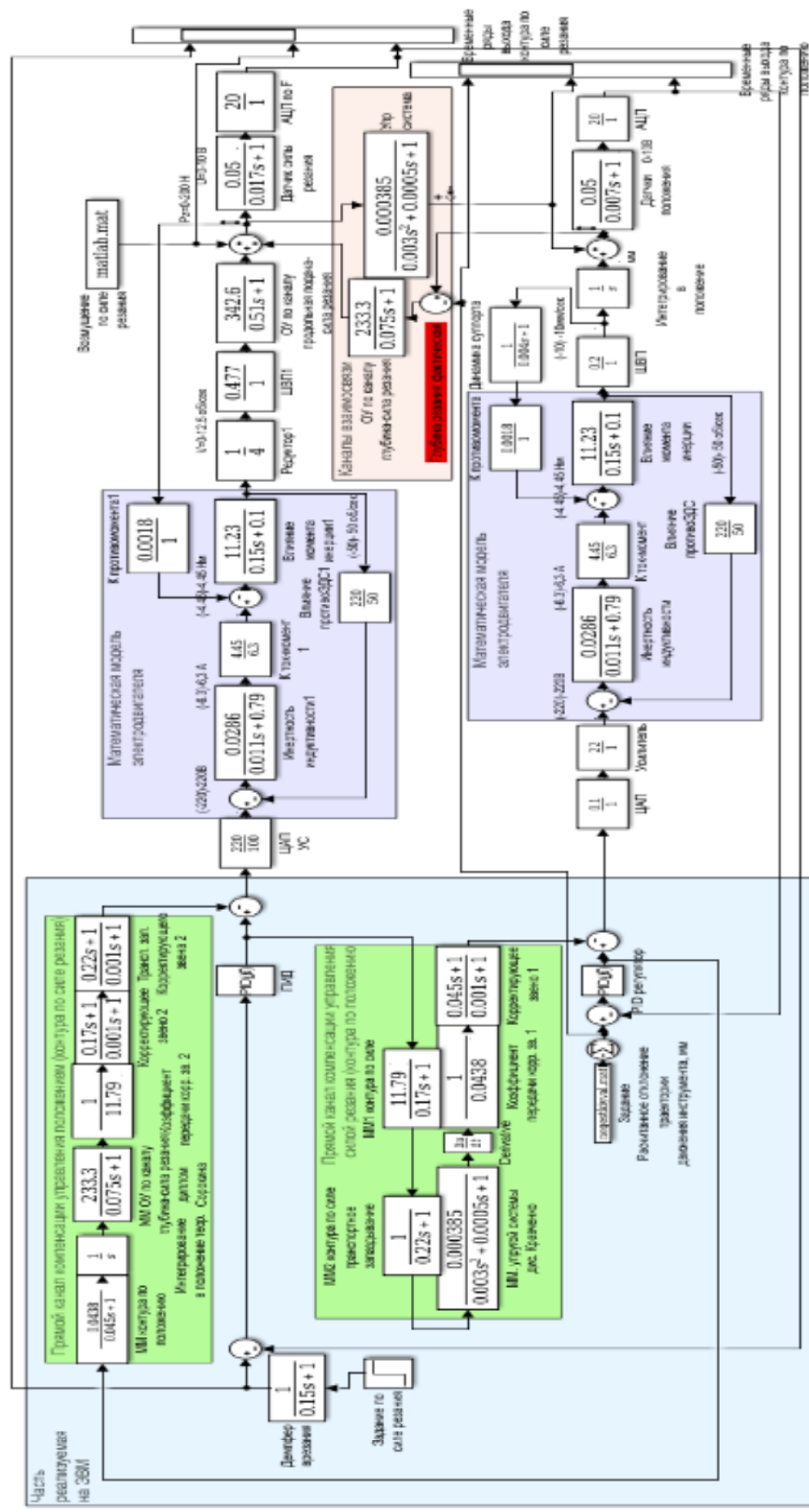


Рис.10. Структурная двухконтурная системы управления с компенсацией взаимосвязи контуров через объект управления

2. Произведено моделирование работы данных контуров управления.
 3. Произведено моделирование работы двухконтурной системы с учетом взаимосвязи контуров и поочередным подключением каналов компенсации взаимосвязи.

4. Произведено моделирование работы рассматриваемой взаимосвязанной системы с подключенными каналами компенсации взаимосвязи при подаче экспериментальных стохастических возмущающих воздействий по силе резания из файла `matlab.mat`. Параметры эксперимента, при котором проводилась фиксация временного ряда силы резания приведены в [2].

5. Произведен анализ полученных данных.

Математическое моделирование проводилось методом `ode4` (Runge-Kutta) с шагом 0.00005 сек

Настройка ПИД регуляторов проводилась в диалоговом режиме при помощи функции `PID Tuner`. Тип регуляторов – непрерывный, ограничение регулятора по управляющему воздействию $\pm 100\%$ для двигателя постоянного тока метод защиты от интегрального насыщения – `Clamping` Результаты настройки ПИД регулятора контура управления положением режущего инструмента и кривая переходного процесса на единичное задающее воздействие представлены на рис. 11.

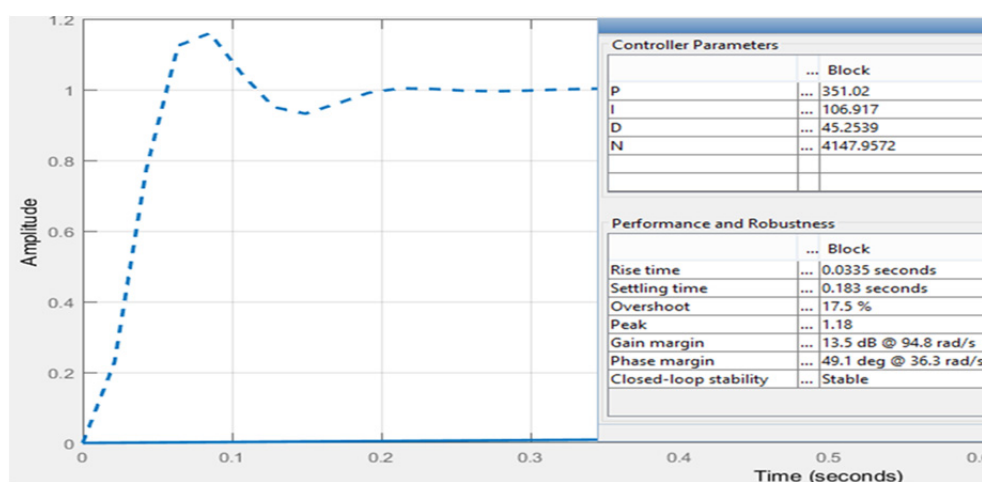


Рис. 11. Параметры настройки ПИД регулятора для контура управления положением

Параметры ПИД регулятора контура управления силой резания и кривая переходного процесса при единичном задающем воздействии представлены на рис. 12.

Результат математического моделирования разрабатываемой системы управления при отключенном прямом канале управления силой резания приведены на рис. 12.

Результат математического моделирования разрабатываемой системы управления при отключенном прямом канале управления положением инструмента приведены на рис. 13.

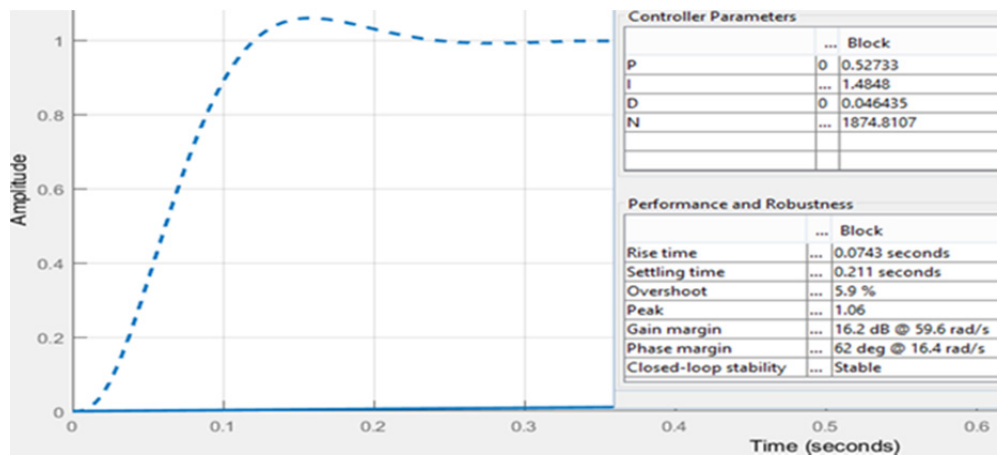


Рис. 12. Параметры настройки ПИД регулятора для контура управления силой резания

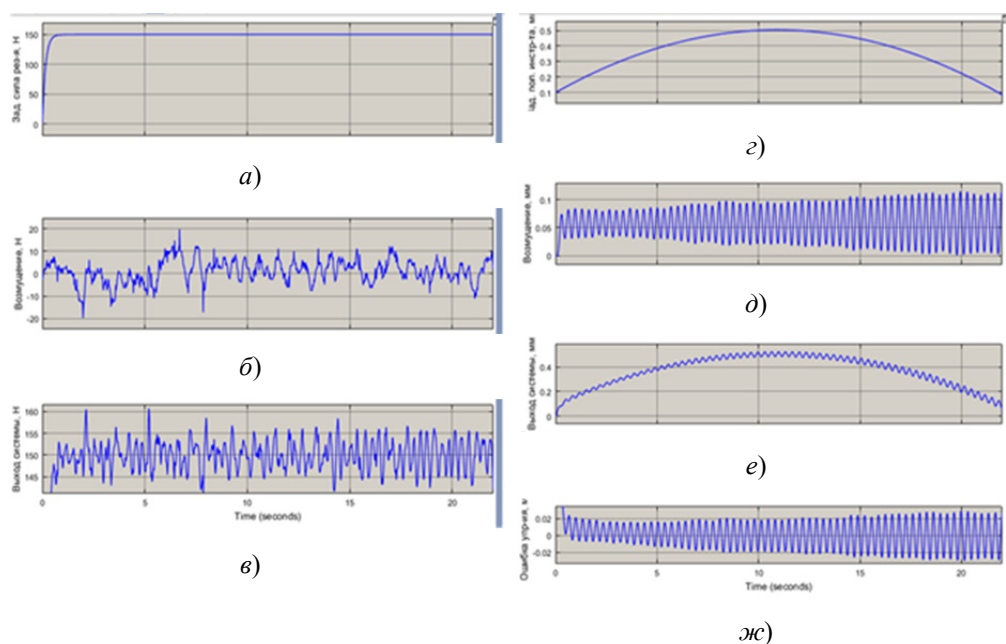


Рис. 13. Временные ряды контуров управления разрабатываемой системы управления: а – зад. по силе резания, Н; б – возмущение, Н; в – выход системы, Н; г – зад. положение инстру-та; д – возмущение, мм; е – выход системы, мм; ж – ошибка упр-я, мм

Результат математического моделирования разрабатываемой системы управления на рис. 14–16.

Анализ результатов моделирования

Проведенный анализ результатов моделирования системы управления позволил выявить следующее.

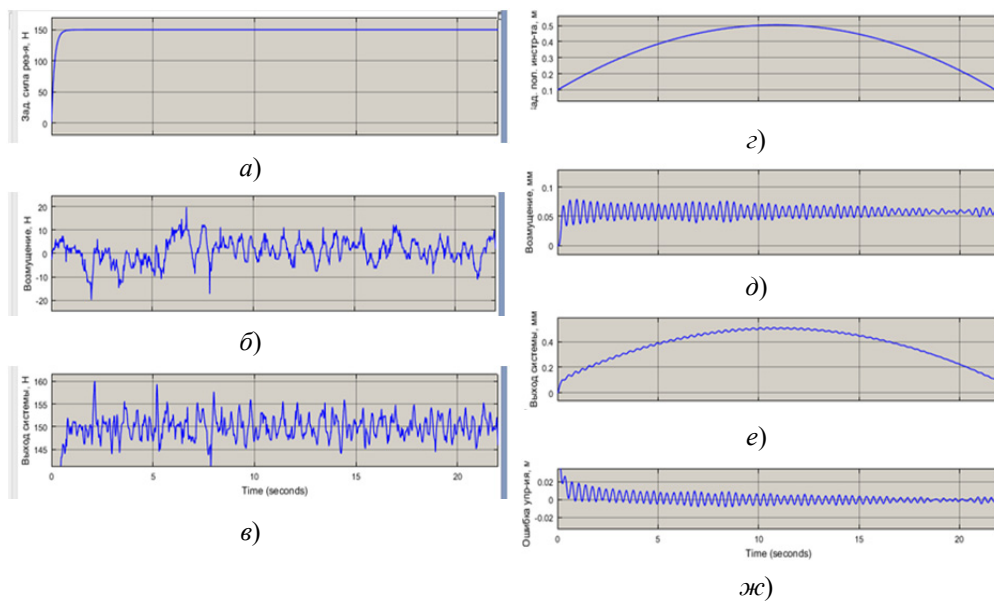


Рис. 14. Временные ряды контуров управления разрабатываемой системы управления: а – зад. по силе резания, Н; б – возмущение, Н; в – выход системы, Н; г – зад. положение инстру-та; д – возмущение, мм; е – выход системы, мм; ж – ошибка упр-я, мм

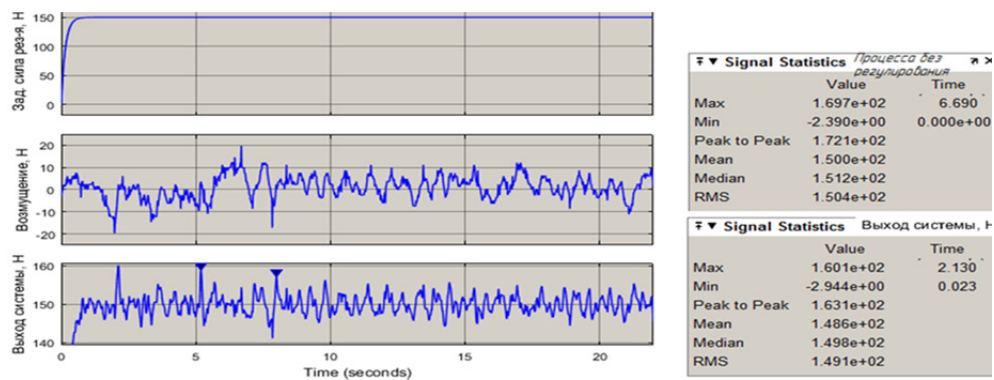


Рис. 15. Временные ряды контура по силе резания разрабатываемой системы

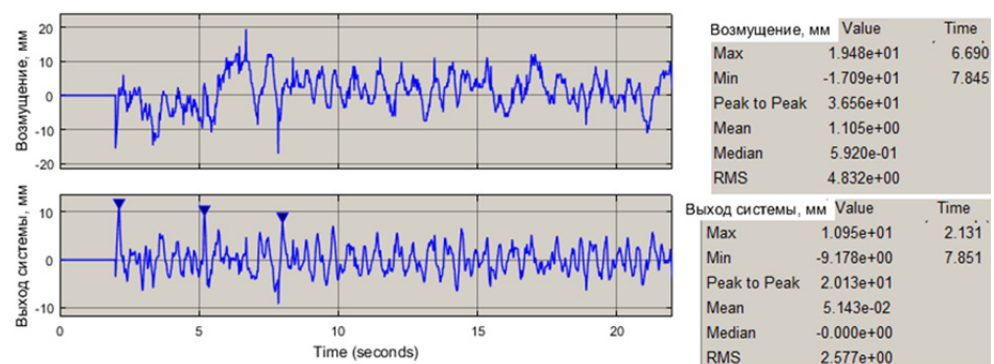


Рис. 16. Временные ряды ошибки управления и возмущения с 2-ой секунды системы управления силой резания

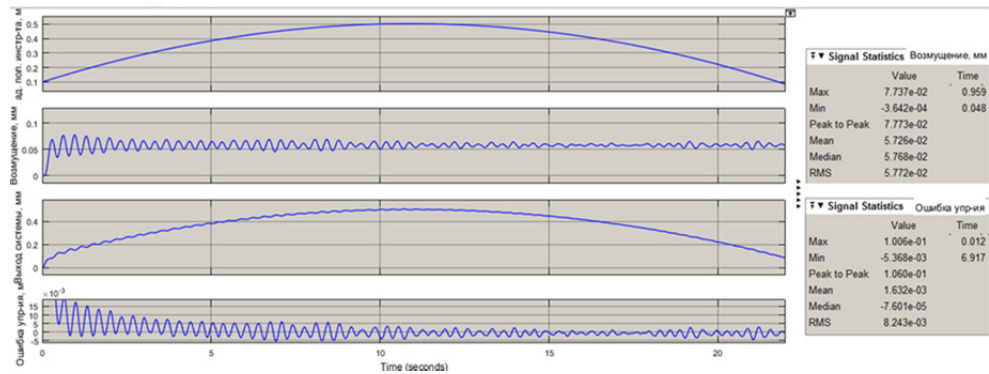


Рис. 17. Временные ряды контура по положению инструмента разрабатываемой системы

Разработанная система управления является устойчивой по двум замкнутым контурам (положения и силы резания) при включенных одновременно прямых каналах управления или при одном включенном прямом канале управления положением режущего инструмента (но с меньшей эффективностью). Система неработоспособна при одном включенном прямом канале управления силой резания – выход обоих контуров системы содержит расходящиеся колебания. При этом качество переходных процессов при плавном врезании позволяет избежать перерегулирования по силе резания и существенного снижения перерегулирования для контура по положению режущего инструмента.

Моделирование системы при подключенных каналах компенсации показало ее эффективность при стохастическом возмущающем воздействии. Среднеквадратическое отклонение СКО (RMS на рисунках) ошибки управления контура по силе резания (рис. 15) составляет 2,57 Н, СКО возмущения по силе резания – 4,83 Н, то есть коэффициент эффективности равен:

$$k_{эф} = \frac{\sigma_f}{\sigma_e} = 1,88.$$

где σ_f – СКО возмущения; σ_e – СКО ошибки управления;

СКО возмущения на контур управления положением режущего инструмента (рис. 16) составляет 0,0577 мм, а для ошибки управления 0,0082 мм, коэффициент эффективности $k_{эф2} = 7$.

При этом контур управления положением режущего инструмента имеет почти в 2 раза меньшую величину СКО при учете взаимосвязи и с подключенными каналами компенсации при стохастическом возмущении по силе резания, чем тот же контур без учета взаимосвязи: $\sigma_1 = 0,0018$ мм и $\sigma_2 = 0,0032$ мм. Это обусловлено уменьшением СКО возмущения на систему управления положением контуром управления силой резания. Следовательно, точность позиционирования режущего инструмента при взаимосвязанной структуре системы управления почти в 2 раза выше, чем для контура по положению без учета взаимосвязи и более чем в 3 раза выше, чем без управления.

Заключение

В работе методом компьютерного моделирования показана принципиальная возможность обеспечения эффективной работы двухконтурной взаимосвязанной системы управления процессом токарной обработки нежестких деталей путем их развязки через каналы прямого управления, что позволяет повысить качество процесса и уменьшить дисперсию регулируемых параметров.

Библиографический список

1. Балакшин, Б. С. Адаптивное управление станками / Б. С. Балакшин, Б. М. Базаров, И. М. Баранчукова. – М. : Машиностроение, 1973. – С. 687.
2. Мостовой, В. Д. Уменьшение дисперсии ошибки системы управления силой резания путем повышения быстродействия управления / В. Д. Мостовой // Актуальные проблемы автоматизации и управления в технических и организационных системах : сб. трудов Междунар. науч. конф. – 2016. – Саратов : Амирит. – С. 130–138.
3. Набилкин, А. Ю. Автоматизированная система управления формой нежестких валов при токарной обработке / А. Ю. Набилкин, С. А. Кравченко, В. П. Бирюков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3 (34), ч. 1. – С. 321–330.
4. Кравченко, С. А. Повышение эффективности системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке / С. А. Кравченко, А. Ю. Набилкин, В. П. Бирюков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3 (34), ч. 1. – С. 339–349.
5. Кравченко, С. А. Обеспечение точности автоматизированной системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке путем повышения эффективности обратной связи : дисс. ... канд. техн. наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении) / Кравченко С. А. – Саратов : типография СГТУ, 2013. – С. 179.
6. Набилкин, А. Ю. Автоматизированная двухкашальная каскадная система управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке : дисс. ... канд. техн. наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении) / Набилкин А. Ю. – Саратов : типография СГТУ, 2013. – С. 188.
7. Официальный сайт компании OMATIVE Ltd. – URL: <http://www.omative.com/>
8. Бирюков, В. П. Создание условий эффективной работы обратной связи систем управления / В. П. Бирюков, В. В. Сотников. – Саратов : Саратовский гос. технический ун-т, 2012. – 272 с.
9. Макаров, И. М. Линейные автоматические системы (элементы, теории, методы расчета и справочный материал) / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М. : Машиностроение, 1977. – 464 с.

Мостовой Владимир Дмитриевич
аспирант,
Саратовский государственный
технический университет
имени Ю. А. Гагарина
E-mail: mvd-bkp@mail.ru

Mostovoy Vladimir Dmitryevich
postgraduate student,
Saratov State Technical University
named after Y. A. Gagarin

Бирюков Владимир Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра атомной энергетики,
Балаковский инженерно-
технологический институт
E-mail: bvp-bittu@mail.ru

Biryukov Vladimir Petrovich

doctor of technical sciences; professor, sub-
department of atomic energetics,
Balakovo Institute of Engineering
and Technology

УДК 681.514

Мостовой, В. Д.

Компенсация взаимосвязи контуров управления поперечной и продольной подачи на основе редуцированной модели токарной обработки / В. Д. Мостовой, В. П. Бирюков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 151–166.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ
СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

*Е. А. Печерская, А. Н. Головяшкин, А. А. Головяшкин,
Т. О. Зинченко, А. В. Печерский, А. В. Фимин*

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL
PARAMETERS ON REPRODUCIBILITY
OF THE PROPERTIES OF ACTIVE DIELECTRICS**

*E. A. Pecherskaya, A. N. Golovyashkin, A. A. Golovyashkin,
T. O. Zinchenko, A. V. Pecherskiy, A. V. Fimin*

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современный этап развития нано- и микроэлектроники связан с использованием активных диэлектриков, которые находят широкое применение в высокочувствительной датчиковой аппаратуре. Актуальной проблемой является повышение воспроизводимости свойств активных диэлектриков, исследование влияния на нее технологических параметров, чему посвящена данная статья. *Материалы и методы.* В работе исследованы активные диэлектрики, обладающие сегнетоэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами. Приведены результаты экспериментального исследования влияния рентгеновского излучения на зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля образцов триглицинсульфата. *Результаты.* Представлено аналитическое описание влияния технологических параметров и различного рода внешних факторов (тепловых, электрических, магнитных, механических) на свойства активных диэлектриков (относительную диэлектрическую проницаемость, поляризованность), которые определяют использование материалов в элементах функциональной электроники. Доказана целесообразность использования рентгеновского излучения для повышения воспроизводимости диэлектрических параметров водородосодержащих сегнетоэлектриков. *Выводы.* Повышение воспроизводимости параметров обусловлено наличием пологих участков в зависимости относительной диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля $\epsilon(E)$ при воздействии рентгеновского излучения, в связи с чем существенно снижаются дополнительные погрешности измерения диэлектрических свойств, обусловленные невозможностью фиксации точных значений технологических параметров.

Ключевые слова: триглицинсульфат, воспроизводимость параметров, дополнительная погрешность, рентгеновское излучение.

Abstract. *Background.* The current stage of development of nano- and microelectronics is connected with the use of active dielectrics, which find wide application in highly sensitive sensor equipment. The actual problem is an increase in the reproducibility of the properties of active dielectrics, the study of the influence of technological parameters on the reproducibility, which is the subject of this article. *Materials and methods.* In the work, active dielectrics with ferroelectric and piezoelectric properties are investigated. The results of an experimental study of the effect of X-ray radiation on the dependence of the relative

permittivity on the electric field strength of triglycine sulfate samples are presented. *Results.* The analytical description of the influence of technological parameters and various external factors (thermal, electric, magnetic, mechanical) on the properties of active dielectrics (relative permittivity, polarity) that define the use of materials in functional electronics elements is presented. The expediency of using X-ray radiation to increase the reproducibility of the dielectric parameters of hydrogen-containing ferroelectrics. *Conclusions.* The increase in the reproducibility of the parameters is due to the presence of gently sloping sections in the dependence of the relative permittivity on the electric field strength $\epsilon(E)$ under the influence of X-ray radiation, and therefore the additional errors in the measurement of dielectric properties are substantially reduced due to the impossibility of fixing the exact values of the process parameters.

Key words: triglycine sulfate, reproducibility of parameters, additional error, X-ray radiation.

Введение

Современный уровень развития приборостроения и возникших на его базе микро- и нанотехнологий в значительной степени определяется широким применением активных диэлектриков. Создание высокочувствительной датчиковой аппаратуры для прецизионного измерения физических величин основано, в том числе, на применении сегнетоэлектрических твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС), которые выпускаются промышленностью в виде керамики [1, 2]. С одной стороны, изделия из керамики не обладают анизотропией свойств, что упрощает описание их характеристик и применение. С другой стороны, большая зависимость свойств керамики ЦТС от фазового состава, зернистости кристаллитов и их структурного совершенства, что определяется технологическими параметрами на всех стадиях изготовления, приводит к необходимости поиска новых методов получения и обработки таких материалов с целью повышения технологической воспроизводимости их основных характеристик. Технология производства керамики ЦТС определяет также скорость деградиационных процессов в материале. Последнее сказывается на длительности эксплуатации изделий на основе активных диэлектриков.

Экстремальные значения пьезочувствительности, пьезомодуля и диэлектрических параметров приходятся на область морфотропного перехода (ОМП) ромбоэдрической и тетрагональной фаз. Однако керамика ЦТС такого состава обладает повышенной чувствительностью к изменению технологических режимов, в том числе, связанных с погрешностью измерений и контроля параметров технологического процесса. Ниже рассмотрено влияние технологических параметров на пьезоэлектрические, сегнетоэлектрические и пироэлектрические свойства активных диэлектриков.

Аналитическое описание влияния технологических параметров на свойства активных диэлектриков

Свойства активных диэлектриков и параметры, влияющие на них, перечислены в табл. 1. Указанные параметры либо фиксируются, либо изменяются в заданных пределах в процессе синтеза материалов.

Таблица 1

Взаимосвязь между технологическими параметрами
и свойствами активных диэлектриков

Свойства активных диэлектриков, обозначение	Аналитическое описание взаимосвязи технологических параметров и свойств материалов
1	2
1. Диэлектрическая восприимчивость, η	$\eta = \frac{\partial P}{\partial E}$, где P – спонтанная поляризованность, E – напряженность электрического поля
2. Константа пьезоэлектрического напряжения, $-a$	$-a = \frac{\partial E}{\partial l}$, где l – механическая деформация
3. Постоянная пьезоэлектрического эффекта, d'	$d' = \frac{\partial l}{\partial E}$
4. Коэффициент упругости, k	$k = \frac{\partial l}{\partial L} = \frac{d}{e}$, где L – механическое напряжение
5. Коэффициент пьезоэлектрического напряжения, e	$e = \frac{\partial P}{\partial l}$
6. Коэффициент обратного пьезоэлектрического напряжения, b'	$b' = \frac{\partial l}{\partial P}$
7. Коэффициент теплового расширения, α	$\alpha = \frac{\partial l}{\partial T}$, где T – термодинамическая температура
8. Пироэлектрический коэффициент, ρ	$\rho = \frac{\partial P}{\partial T}$
9. Коэффициент пьезоэлектрической деформации, d	$d = \frac{\partial P}{\partial L}$
10. Коэффициент обратной пьезоэлектрической деформации, $-a'$	$-a' = \frac{\partial L}{\partial P}$
11. Электромагнитная восприимчивость, $\eta^{\text{эм}}$	$\eta^{\text{эм}} = \frac{\partial P}{\partial H}$, где H – напряженность магнитного поля
12. Магнитоэлектрическая восприимчивость, $\eta^{\text{мэ}}$	$\eta^{\text{мэ}} = \frac{\partial M}{\partial E}$, M – намагниченность
13. Магнитная восприимчивость, $\eta^{\text{м}}$	$\eta^{\text{м}} = \frac{\partial M}{\partial H}$
14. Коэффициент, описывающий влияние давления y на температуру Кюри T_C , $n_{T_C, y}$	$n_{T_C, y} = \frac{\partial T_C}{\partial y}$
15. Коэффициент, описывающий влияние γ -облучения дозой D на T_C , $n_{T_C, D}$	$n_{T_C, D} = \frac{\partial T_C}{\partial D}$

1	2
16. Коэффициент, описывающий влияние γ -облучения дозой D на P , $n_{P,D}$	$n_{P,D} = \frac{\partial P}{\partial D}$
17. Коэффициент, описывающий влияние химического состава (например, процентное содержание Ва) x на T_C , $n_{T_C,x}$	$n_{T_C,x} = \frac{\partial T_C}{\partial x}$
18. Коэффициент, описывающий влияние меры дефектности образца ξ на P , $n_{P,\xi}$	$n_{P,\xi} = \frac{\partial P}{\partial \xi}$
19. Коэффициент, описывающий влияние частоты f на P , $n_{P,f}$	$n_{P,f} = \frac{\partial P}{\partial f}$
20. Коэффициент, описывающий влияние x на P , $n_{P,x}$	$n_{P,x} = \frac{\partial P}{\partial x}$

В общем виде аналитическое описание влияния технологических параметров на свойства активных диэлектриков целесообразно представить в виде следующей модели:

$$\begin{cases} \partial M = \eta^M \partial E + \eta^H \partial H, \\ \partial E = -a \partial l, \\ \partial l = \alpha \partial T + d' \partial E + k \partial L + b' \partial P, \\ \partial P = \rho \partial T + \eta \partial E + n_{P,\xi} \partial \xi + n_{P,x} \partial x + d \partial L + \eta^M \partial M + n_{P,D} \partial D + n_{P,f} \partial f + e \partial l, \\ \partial T_C = n_{T_C,x} \partial x + n_{T_C,D} \partial D + n_{T_C,y} \partial y, \\ \partial L = -a' \partial P. \end{cases} \quad (1)$$

Модель (1) при существенном влиянии температуры, механического напряжения, напряженности электрического поля преобразуется в модель взаимосвязи параметров сегнетоэлектрика, рассмотренную в работах [3–5].

При отклонении технологических параметров от номинальных значений согласно системе уравнений (1) имеет место изменение свойств материала, которое влияет на воспроизводимость его свойств. Рассмотрим пример определения дополнительной погрешности измерения диэлектрической восприимчивости активных диэлектриков, обусловленной отклонением влияющих факторов от номинальных значений в технологическом процессе.

Результат измерения диэлектрической восприимчивости $\tilde{\eta}$ включает в себя абсолютную дополнительную погрешность $\Delta_{\text{дп}}$:

$$\tilde{\eta} = \eta + \Delta_{\text{дп}} = \frac{\partial P + \Delta_{\text{дп}}}{\partial E}, \quad (2)$$

где $\Delta_{\Delta P \eta}$ – абсолютная погрешность измерения реакции – поляризованности при информативном параметре – воздействии в виде напряженности электрического поля.

В формуле (2) перед $\Delta_{\Delta P \eta}$ стоит знак «+», так как $\Delta_{\Delta P \eta}$ – предельное значение абсолютной погрешности, действительное значение которой $\varepsilon_{\Delta P \eta} \in [-\Delta_{\Delta P \eta}, +\Delta_{\Delta P \eta}]$.

Из формулы (1) выразим $\Delta_{\Delta P \eta}$:

$$\partial P = \eta \cdot \partial E + \Delta_{\Delta P \eta},$$

$$\Delta_{\Delta P \eta} = \rho \partial T + n_{P,\xi} \partial \xi + n_{P,x} \partial x + d \partial L + \eta^{\text{эм}} \partial M + n_{P,D} \partial D + n_{P,f} \partial f + e \partial l.$$

Предельная дополнительная абсолютная погрешность измерения диэлектрической восприимчивости $\Delta_{\Delta \eta}$ связана с $\Delta_{\Delta P \eta}$ следующим образом:

$$\Delta_{\Delta \eta} = \frac{\partial P + \Delta_{\Delta P \eta}}{\partial E} - \frac{\partial P}{\partial E} = \frac{\Delta_{\Delta P \eta}}{\partial E}. \quad (3)$$

В относительном виде предельная дополнительная погрешность измерения диэлектрической восприимчивости $\delta_{\Delta \eta}$ определяется следующим образом:

$$\delta_{\Delta \eta} = \frac{\Delta_{\Delta \eta}}{\eta} = \frac{\Delta_{\Delta P \eta}}{\partial P}. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) позволяет заключить, что $\delta_{\Delta \eta} = \delta_{\Delta P \eta}$. Это указывает на то, что относительное отклонение поляризации материала от требуемого значения в технологическом процессе приводит численно к такому же относительному отклонению от требуемого значения диэлектрической восприимчивости.

Аналогичным образом, авторами получены выражения для оценивания погрешностей других свойств активных диэлектриков, обусловленные именно изменением технологических режимов. Таким образом, низкая технологическая воспроизводимость свойств (дополнительная погрешность от влияющих факторов может достигать десятки процентов) накладывает ограничения на использование материалов в элементах функциональной электроники.

Применение рентгеновского облучения для повышения воспроизводимости параметров активных диэлектриков

Для решения задач, связанных с повышением воспроизводимости свойств и пьезоэлектрических характеристик, в качестве дополнительной обработки материала предлагается использовать рентгеновское излучение. Облучение рентгеновскими лучами имеет преимущество перед традиционным термическим отжигом. Скорость и эффективность отжига дефектов зависят от разности значений реальной и равновесной их концентраций. С ростом

температуры абсолютное значение равновесной концентрации повышается. Рентгеновское облучение можно проводить при комнатных температурах. Облучение более жестким электромагнитным излучением вызывает образование вторичных радиационных дефектов. По сравнению с электронным облучением рентгеновское позволяет провести равномерную обработку материала по всей его толщине. Проведенные авторами эксперименты и исследования показали, что миграция точечных дефектов под действием рентгеновского излучения в электрическом поле спонтанной поляризации приводит к их радиационному отжигу и закреплению поляризованного состояния. Этот процесс можно использовать как для повышения, так и для усреднения основных электрофизических характеристик керамики ЦТС, а также для изменения времени старения материала. Альтернативным способом повышения пьезочувствительности является метод перфорации. Суть метода – создание на одной рабочей поверхности пьезоэлемента сетчатого рифления. Недостатком этого метода является необходимость сложных технологических операций на этапе изготовления и контроля микрорельефа сложной формы, а также снижение механической прочности материала при перфорации.

Взаимодействие рентгеновского излучения с моно- поликристаллическими и керамическими сегнетоэлектриками достаточно полно описывается процессами, связанными с фотоэффектом и вторичным облучением комптоновскими электронами. Их проявления зависят от характера химических связей в веществе. Так у водородосодержащих сегнетоэлектриков (ТГС, ДТГС) облучение понижает диэлектрическую проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Причем подавление высоких значений диэлектрической проницаемости в точке Кюри ϵ_{max} и $\text{tg}\delta$ имеют одну и ту же феноменологическую причину – выключение доменного вклада за счет блокирования доменных границ дефектами в электрических полях, меньших значения коэрцитивного поля [6]. Влияние радиации на ТГС, ДТГС, KDP, ГАС и другие кристаллы проявляется, кроме того, в искажении петель гистерезиса благодаря закреплению доменных стенок на дефектах и возникновению внутреннего электрического поля смещения.

В облученных сегнетоэлектриках кислородно-октаэдрного типа со структурой перовскита и общей формулой ABO_3 наиболее ощутимые изменения происходят на уровне электронной структуры кристалла, которые носят динамический характер, а ионизирующая радиация играет роль активирующего фактора процессов миграции дефектов. Экспериментальные данные по поведению электропроводности облученных кристаллов ABO_3 у разных авторов достаточно противоречивы: от вывода о несущественных изменениях до повышения удельного объемного сопротивления на несколько порядков. Наиболее разнообразно влияние рентгеновского излучения на электропроводность многокомпонентных твердых растворов ЦТС, где велика роль предыстории образцов, изменения зерновой структуры при спекании в параэлектрической фазе. В отличие от водородосодержащих сегнетоэлектриков у керамики ЦТСЛ-1/65/35 при малых дозах (до 10^6 Р) наблюдается обратное явление – рост ϵ_{max} , что в работе [7] связано с радиационным отжигом

естественных дефектов. У этой керамики после облучения сохранилась, как и у ТГС, устойчивая тенденция к снижению $\text{tg}\delta$. Структурно-чувствительными параметрами при этом являются симметрия кристаллических фаз, параметры элементарных ячеек, текстура и внутрикристаллитные микродеформации. Изменения структурно-чувствительных параметров сказываются на всех электрофизических свойствах сегнетокерамики.

Анализируя технологическую воспроизводимость свойств сегнетокерамики ЦТС, следует обратить внимание на неравномерность распределения примесей, которые влияют на протяженность ОМП. В связи с этим актуален вопрос о временной и температурной стабильностях параметров. Изготовители сегнетокерамики вынуждены использовать составы ЦТС ромбоэдрической и тетрагональной фаз для поддержания стабильности свойств, поступаясь их экстремальными значениями, характерными для составов из ОМП.

Теоретическое обоснование режимов рентгеновского облучения для управления электрофизическими параметрами керамики ЦТС с фазовым составом вблизи ОМП требуют детального изучения поведения точечных дефектов в этих материалах.

Возможность контролируемого изменения электрофизических параметров активных диэлектриков без существенных изменений в технологии их производства позволяет сравнительно просто улучшать эксплуатационные характеристики приборов, изготавливаемых на их основе. Полученные модельные представления о процессах, происходящие в сегнетоэлектриках при рентгеновском облучении, сокращают время для поиска оптимальных режимов обработки материалов.

На основе анализа закономерностей преобразования первичного рентгеновского излучения во внутреннее электронное облучение получены выражение для расчета процессов взаимодействия рентгеновского излучения с точечными дефектами кристалла [8]. Для исключения образования вторичных радиационных дефектов и начала процессов упругих смещений точечных дефектов необходимо, чтобы энергия комптоновских электронов находилась в интервале от 5 до 100 кэВ. В кристаллах со структурой перовскита (например, в ЦТС – керамике) в слабых полях при комнатной температуре увеличение дозы рентгеновского излучения приводит к понижению относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь [9]. Однако, при малых дозах, облучение может приводить к росту относительной диэлектрической проницаемости, в тоже время, тангенс угла диэлектрических потерь снижается. Основные изменения происходят на уровне электронной структуры кристалла, носят динамический характер, где ионизирующая радиация играет роль активирующего фактора для процессов миграции дефектов и примесей. При рентгеновском облучении кристаллов ТГС в зависимости относительной диэлектрической проницаемости от амплитудного значения напряженности электрического поля $\epsilon(E)$ появляется пологий участок (рис. 1), который выражен тем сильнее, чем выше суммарная доза облучения. выводы хорошо согласуются с результатами эксперимента, описанными в [10].

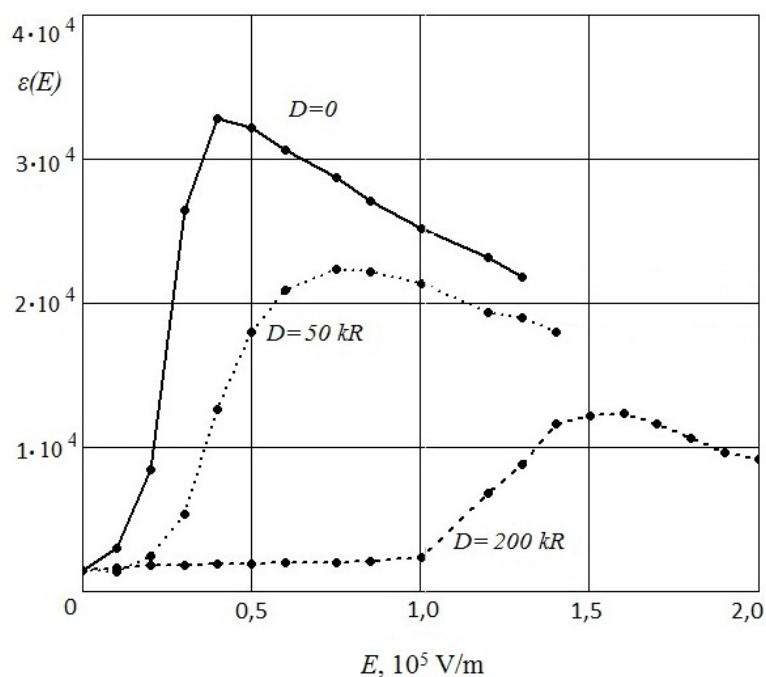


Рис. 1. Зависимости $\varepsilon(E)$ для номинально чистого ТГС при разных дозах облучения. Измерения получены при температуре $T = 20^\circ\text{C}$, частоте электрического поля $f = 50$ Гц

В зависимостях $\varepsilon(E)$ имеют место амплитудно-независимые участки, что обусловлено отсутствием процесса переполаризации в части объема образца, закреплением части доменных стенок радиационными дефектами. Благодаря возникновению подобных амплитудно-независимых участков возможно существенное снижение дополнительных погрешностей измерения диэлектрических параметров сегнетоэлектриков, обусловленных отклонением влияющих факторов (в данном случае, амплитуды напряженности электрического поля) от номинальных значений. Результаты экспериментального определения зависимости $\varepsilon(E)$ подтверждают снижение дополнительной погрешности измерения относительной диэлектрической проницаемости образца, облученного дозой радиации D по сравнению с необлученным образцом. Например, в окрестностях амплитудного значения $E = 0,3$ кВ/см дополнительная погрешность измерения относительной диэлектрической проницаемости уменьшается не менее, чем в 2,5 раза при облучении дозой $D = 50$ кР, в то же время, при облучении дозой радиации $D = 200$ кР имеет место снижение дополнительной погрешности не менее, чем в 200 раз. Это подчеркивает целесообразность использования рентгеновского облучения для повышения воспроизводимости параметров сегнетоэлектриков.

Рассмотрим закономерности преобразования первичного рентгеновского излучения во внутреннее электронное излучение, что позволит получить выражения для расчета числа смещений дефекта в единицу времени. Это в свою очередь характеризует эффективность радиационного отжига и миграции точечных дефектов в кристаллах [8].

Скорость изменения отжигаемых или закрепляющихся дефектов на доменных границах зависит от концентрации N . Для времени облучения t может быть записано линейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN}{dt} = zN(t). \quad (5)$$

Общее решение (5) при максимальной концентрации отжигаемых дефектов $N_{\max}$ имеет вид:

$$N(t) = C_1 \exp(zt) + C_2, \quad (6)$$

где C_1 и C_2 определяются граничными условиями:

$$\begin{cases} N = N_{\max}, \text{ при } t \rightarrow \infty, \\ N(0) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Используя (6) и (7), окончательно получаем:

$$N(t) = N_{\max} (1 - \exp(zt)). \quad (8)$$

Величина z зависит от числа столкновений B , приходящихся на один дефект, вероятности встречи парных дефектов G и от отношения числа перемещений, приводящих к отжигу или закреплению, к общему числу смещений η :

$$z = -BG\eta. \quad (9)$$

На основе выражений (7)–(9) описана рекомбинация дефектов на доменных границах.

Разработанные модельные представления о процессах, происходящих в монокристаллических и сегнетокерамических материалах при рентгеновском облучении учитывают миграцию дефектов в кристаллической фазе под действием комптоновских электронов энергией до 100 кэВ. При этом сокращается время поиска оптимальных режимов обработки материалов, возможно установление общих закономерностей и различий в поведении сегнетокерамических и других типов структур, применяемых в изделиях функциональной электроники.

Заключение

Предложена модель (1), представляющая аналитическое описание влияния различного рода параметров (тепловых, электрических, магнитных и т.д.) на свойства активных диэлектриков, которая позволяет установить параметры технологического процесса и внешние факторы, оказывающие влияние на свойства материалов. Получено выражение для расчета дополнительной погрешности измерения относительной диэлектрической проницаемости, обусловленной отклонением напряженности электрического поля (это отклонение может быть обусловлено прямыми и обратными физическими эффектами, имеющими место в активных диэлектриках) от номинального значения.

В свою очередь, указанная дополнительная погрешность снижает воспроизводимость диэлектрических параметров материалов, что негативно влияет на качество технологических процессов. Для минимизации указанного недостатка рассмотрено использование рентгеновского облучения активных диэлектриков, которое в зависимости от дозы облучения приводит к стабилизации диэлектрических параметров (в определенном диапазоне воздействующего электрического поля), что в свою очередь существенно повышает воспроизводимость диэлектрических свойств материалов. Управление свойствами сегнетоэлектриков позволяет разрабатывать и проектировать нано- и микроэлектронные устройства на основе МДП-структур, которые можно использовать в качестве элементов памяти и чувствительных элементов для биохимических сенсоров [10].

Библиографический список

1. Головяшкин, А. Н. Датчики на основе биосенсоров и химически чувствительных полевых транзисторов / А. Н. Головяшкин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2010. – Т. 1. – С. 459.
2. Васильев, В. А. Частотные преобразователи для датчиков давления на основе нано- и микроэлектромеханических систем : монография / В. А. Васильев, Н. В. Громков, А. Н. Головяшкин. – Пенза : Изд-во ПГУ. – 130 с.
3. Печерская, Е. А. Применение методологии функционального и метрологического анализа к качеству исследования материалов микро- и наноэлектроники / Е. А. Печерская // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 94–98.
4. Печерская, Е. А. Метрологические аспекты модели активного диэлектрика / Е. А. Печерская, Д. В. Рябов, Н. Д. Якушова // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2012. – № 1. – С. 208–213.
5. Печерская, Е. А. Методы и средства исследования активных диэлектриков для наноиндустрии: системный подход : монография / Е. А. Печерская. – Пенза : ПГУ, 2008. – 129 с.
6. Пешиков Е.В., Законы импульсной переполаризации кристаллов триглицинсульфата / Е. В. Пешиков // Кристаллография. – 1969. – Т. 14, вып. 6. – С. 1074–1077.
7. Kruger H.A., Cook W.R., Sartain C.C., Yocney H.P. J. Appl. Phys., 34, 218 (1994).
8. Головяшкин, А. Н. Электронные процессы в облученной керамике ЦТС / А. Н. Головяшкин, Р. М. Печерская // Тез. докл. 7-го Международного семинара по физике сегнетоэлектриков-полупроводников. – Ростов-на-Дону, 1996. – С. 133.
9. Голицына, О. М. Влияние рентгеновского излучения на эффективную нелинейность кристаллов группы триглицинсульфата / О. М. Голицына, С. Н. Дрождин // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, вып. 1. – С. 129–133.
10. Головяшкин, А. А. Расчет порогового напряжения МДП-структуры с учетом парциальных зарядов подвижных носителей заряда / А. А. Головяшкин, А. Н. Головяшкин // Молодой ученый. – 2015. – № 4. – С. 129–132.

Печерская Екатерина Анатольевна
доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный
университет
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolyevna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano
and microelectronics,
Penza State University

Головяшкин Алексей Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный
университет
E-mail: angpenza@gmail.com

Golovyashkin Aleksey Nikolayevich
candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of nano
and microelectronics,
Penza State University

Головяшкин Алексей Алексеевич
аспирант,
Пензенский государственный
университет
E-mail: angpenza@gmail.com

Golovyashkin Aleksey Alekseyevich
postgraduate student,
Penza State University

Зинченко Тимур Олегович
магистрант,
Пензенский государственный университет
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich
undergraduate student,
Penza State University

Печерский Анатолий Вадимович
доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: ura258@yandex.ru

Pecherskiy Anatoly Vadimovich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano
and microelectronics,
Penza State University,

Фимин Андрей Владимирович
магистрант,
Пензенский государственный университет
E-mail: andrey_fimin_pgu@mail.ru

Fimin Andrey Vladimirovich
undergraduate student,
Penza State University

УДК 621.3.088.23

Исследование влияния технологических параметров на воспроизводимость свойств активных диэлектриков / Е. А. Печерская, А. Н. Головяшкин, А. А. Головяшкин, Т. О. Зинченко, А. В. Печерский, А. В. Фимин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 167–177.

ДИХОТОМИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ГРАФА

К. С. Подшивалова, С. Ф. Подшивалов

DICHOTOMOUS ROUTING TRANSPORT GRAPH

K. S. Podshivalova, S. F. Podshivalov

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается вопрос дихотомической маршрутизации в комбинированной системе доставки груза по кольцевым схемам с одной базы. Расчет таких сложных систем развозки или сбора груза производится приближенными эвристическими методами, когда выполняется декомпозиция транспортной сети и ее деление на кластеры. В основе лежит многоэтапная модель расчета, состоящая из определения набора кластеров и решения задачи маршрутизации в них. Существует различные методики расчета этапов, однако общим их недостатком является ограничение поиска в глубину по всей транспортной сети на основе выбранного критерия оптимальности целевой функции. Задачей исследований является разработка методики одновременного решения задач кластеризации и маршрутизации. *Материалы и методы.* Поставленная цель достигается при использовании методики фиктивных узлов и ветвей с двумя контрольными узлами, а также создании единого кольцевого маршрута без пересечений, проходящего через все базы и пункты разгрузки. Выполнение ограничений по количеству вершин достигается блокировкой ветвей на дереве решений, приводящей к их невыполнению. Выбор оптимального маршрута производится из анализа всех вариантов сочетаний расположения контрольных вершин. После проведения первого этапа операция дихотомического деления повторяется. *Результаты.* Проверка достоверности разработанного метода осуществлялась на численном примере транспортного графа из девяти вершин. Определены два маршрута по четыре пункта разгрузки груза. После их деления получены четыре схемы движения, содержащих по две вершины. Результаты сравнивались с данными расчетов по методу Кларка-Райта. *Выводы.* Установлено, что предложенный метод дихотомической маршрутизации позволяет получить оптимальную схему движения.

Ключевые слова: транспортный граф, маршрутизация, алгоритм, метод фиктивных узлов и ветвей, контрольные вершины, кольцевые схемы движения.

Abstract. *Background.* The issue of dichotomous routing in the combined system of cargo delivery by ring schemes from one base is considered. Calculation of such complex systems of transportation or collection of cargo is carried out by approximate heuristic methods, when the transport network is decomposed and its division into clusters. The basis is a multi-stage calculation model, consisting of defining a set of clusters and solving the routing problem in them. There are different methods for calculating the stages, but their common disadvantage is the restriction of depth-based search throughout the transport network based on the criterion of optimality of the objective function chosen. *Goal.* The task of the research is to develop a methodology for simultaneously solving the problems of clustering and routing. *Materials and methods.* The goal is achieved by using the technique of fictitious nodes and branches with two control nodes, and also creating a single circular route without intersections passing through all bases and points of discharge. Execution of

restrictions on the number of vertices is achieved by blocking the branches in the decision tree, leading to their failure to perform. The choice of the optimal route is made from an analysis of all variants of combinations of the location of control vertices. After the first stage, the operation of the dichotomous division is repeated. *Results.* The verification of the reliability of the developed method was carried out on a numerical example of a transport graph of nine vertices. There are two routes for four cargo unloading points. After their division, four motion patterns are obtained, containing two vertices. The results were compared with the Clark-Wright calculation data. *Conclusions.* It is established that the proposed method of dichotomous routing allows to obtain the optimal scheme of motion.

Key words: transport, routing, graph algorithm, method of fictitious nodes and branches, control top, circular movement scheme.

Введение

Расчет маршрута передвижения груза моделируется транспортным графом. Транспортным называется граф с указанными базовыми (грузообразующими) вершинами и пунктами разгрузки или погрузки груза. Эффективность логистического сопровождения товара зависит от решения задачи маршрутизации. В общем случае возможны две ее постановки – однокольцевая и многокольцевая развозка груза. Первая решается без анализа грузоподъемности транспортного средства, а вторая с его учетом. Все остальные виды задач, упоминающиеся в литературе, являются частными вариантами двух выше указанных. Следует отметить, что данное исследование не распространяется на решение экономической транспортной задачи, которая относится к вопросу распределения материальных потоков от грузоотправителей, а не к проблеме маршрутизации.

Первый тип задачи возникает, когда начальный и конечный пункты передвижения совпадают с базовым и образуется один кольцевой маршрут. Задача поиска оптимального пути по нему, при посещении пунктов разгрузки один раз, относится к классической задаче «коммивояжера». Если после разгрузки груза автомобиль не возвращается на базу, то получают разомкнутый маршрут. Его поиск сводится к задаче «коммивояжера» путем создания фиктивной кольцевой схемы движения [1]. Задачи маршрутизации в форме модели «коммивояжера» по мнению всех исследователей, является NP-трудной. Ее анализ показал, что причина заключается в древовидности ее решения с большим количеством ветвей, которое не может быть найдено за полиномиальное время.

Второй тип задачи маршрутизации характерен для комбинированной и интегрированной систем доставки грузов [2–5]. Для ее решения используются приближенные эвристические методы. В литературе имеются различные виды их классификации, например [6].

Общим недостатком эвристических методик является многоэтапная схема расчета, требующая проведения отдельных операций, связанных с декомпозицией, последующей кластеризацией и определением оптимальной схемы передвижения внутри них. В результате ограничивается возможность поиска оптимальной ветви в глубину на всей транспортной сети по выбранному критерию целевой функции. Поэтому часто найденное решение требует дополнительной проверки и его оптимизации с помощью метода рекурсии, используя различные ее методики, например [6, 7].

Данное исследование направлено на устранение указанных недостатков при многокольцевой задаче маршрутизации для комбинированной системы доставки товара с одной базовой вершиной.

Модель и алгоритм расчета

Формулировка задачи состоит в следующем. Задан транспортный граф. Вес груза в каждом пункте одинаков. Установлено количество маршрутов и число пунктов в каждом из них зависимости от грузоподъемности транспортных средств. Требуется провести дихотомическую маршрутизацию с целью нахождения минимальной длины маршрута.

Для решения задачи используем точный метод фиктивных узлов и ветвей (ФУВ) с использованием контрольных узлов [2]. При этом в модель [2] введено несколько изменений, геометрическая интерпретация которых представлена на рис. 1.

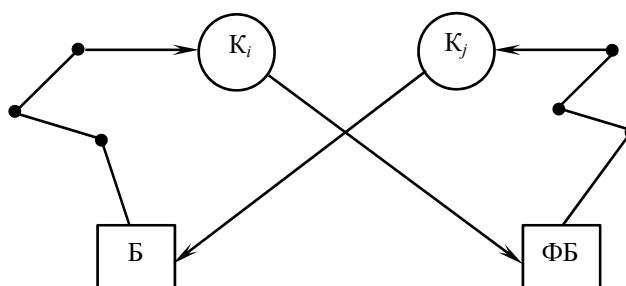


Рис. 1. Геометрическая модель маршрутизации

Буквой Б обозначена действительная база, а буквами ФБ – вводимая фиктивная базовая вершина. Контрольные узлы обозначены K_i и K_j . В качестве них выступает конечный пункт разгрузки на каждом маршруте. Они соединяются с базами ориентированными холостыми пробегами. Каждое искомое кольцо представляется цепью. На рисунке точками изображены промежуточные пункты разгрузки груза в каждом кольце. Выполнение ограничений по количеству вершин достигается поиском и блокировкой ветвей на дереве решений, приводящими к их невыполнению. После проведения первого этапа дихотомического разделения, полученные кольца делятся аналогично еще раз пополам до нужного количества пунктов в каждом кольцевом маршруте.

Алгоритм решения задачи маршрутизации состоит в следующем:

1. Вводим в транспортный граф фиктивную базовую вершину.
2. Соединяем ее с действительными узлами фиктивными связями.
3. Выбираем контрольные вершины.
4. Назначаем ориентированные ветви от контрольных вершин в фиктивную и действительную базы.
5. Назначаем ориентированные хорды, идущие от действительной и фиктивной баз в смежные узлы.
6. Исключаем связи между контрольными узлами.

7. Составляем расчетную матрицу расстояний.
8. Производим в расчетной матрице операцию приведения.
9. Выполняем оценку элементов расчетной матрицы.
10. Включаем в маршрут ветвь с наибольшей оценкой.
11. Производим формирование цепей маршрута.
12. Проверяем выполнение ограничений по количеству вершин в цепях маршрута по условию задачи.
13. Если полученные параметры маршрута превышают установленные ограничения, то блокируем в оценочной матрице хорду с наибольшей оценкой.
14. Возвращаемся в пункт 8.
15. Вычеркиваем в оценочной матрице ветвь с наибольшей оценкой.
16. Получаем новую расчетную матрицу меньшего размера.
17. Блокируем ветви против заикливания.
18. Возвращаемся в пункт 8.
19. Рациональный маршрут выбирается из сравнения всех вариантов сочетаний вычеркивания ветвей на дереве решений для выбранных контрольных узлов.
20. Возвращаемся в пункт 3.
21. Оптимальный маршрут выбирается из сравнения рациональных вариантов, полученных при рассмотрении всех схем сочетаний контрольных вершин.

Следует отметить, что пункты 7–12 аналогичны алгоритму метода ветвей и границ [8]. Таким образом, благодаря применению метода ФУВ и принятой расчетной модели транспортного графа задача маршрутизации сведена к поиску только одного оптимального маршрута, проходящего через все базы и пункты разгрузки при удовлетворении установленных ограничений.

Рассмотрим результат применения разработанного алгоритма на численном примере.

Численный эксперимент

Требуется доставить в каждую из вершин транспортного графа из восьми пунктов груз весом 1 т автомобилем грузоподъемностью две тонны. Базовая вершина одна. Необходимо запроектировать кольцевые маршруты наименьшей суммарной длины. Матрица расстояний представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица расстояний

	1	2	3	4	5	6	7	8	Б
1		3	4	6	7	8	2	5	1
2	3		5	3	6	4	2	6	8
3	4	5		6	3	4	3	5	4
4	6	3	6		6	7	8	1	5
5	7	6	3	6		3	2	5	5
6	8	4	4	7	3		7	6	3
7	2	2	3	8	2	7		4	6
8	5	6	5	1	5	6	4		2
Б	1	8	4	5	5	3	6	2	

По условию задачи при максимальной загрузке автомобиля потребуются четыре кольцевых маршрута с двумя пунктами разгрузки в каждом из них. Расчет производим в два этапа. На первом этапе производим дихотомическое деление на два маршрута по четыре пункта разгрузки в каждом. На втором этапе полученные кольца делим еще раз пополам.

Вводим в транспортный граф фиктивную базовую вершину и соединяем ее со смежными узлами фиктивными ориентированными хордами. Выполняем первый этап. Выбираем в качестве примера контрольные узлы 8 и 3. Выполняем пункты 4, 5, 6 и 7 алгоритма. Геометрическая схема модели расчета показана на рис. 1. Расчетная матрица показана в табл. 2.

Таблица 2

Расчетная матрица

	1	2	3	4	5	6	7	8	Б	ФБ
1		3	4	6	7	8	2	5		
2	3		5	3	6	4	2	6		
3									4	
4	6	3	6		6	7	8	1		
5	7	6	3	6		3	2	5		
6	8	4	4	7	3		7	6		
7	2	2	3	8	2	7		4		
8										2
Б	1	8		5	5	3	6			
ФБ	1	8		5	5	3	6			

Выполняем пункты 8 и 9 алгоритма и получаем оценочную матрицу, табл. 3.

Таблица 3

Оценочная матрица

	1	2	3	4	5	6	7	8	Б	ФБ
1		1	1	3	5	5	1 0	3		
2	1		2	3 0	4	1	0 0	4		
3									∞ 0	
4	5	2	4		5	5	7 0	4 0		
5	5	4	0 0	3		1 0	0 0	3		
6	5	1	0 0	3	0 0		4	3		
7	0 0	1 0	0 0	5	0 0	4		2		
8										∞ 0
Б	1 0	7		3	4	1	5			
ФБ	1 0	7		3	4	1	5			

В табл. 3 последовательно вычеркиваем ветви с наибольшими оценками: 3-Б, 8-ФБ, 4-8 и 2-4, которые выделены цветом. Блокируем ячейки ФБ-4 и ФБ-2. Производим формирование цепи маршрута, согласно пункта 11, из удаленных хорд: 2-4-8-ФБ. По условию 12 алгоритма сравниваем параметры цепи с наложенным ограничением по количеству пунктов при постановке задачи. Количество вершин в цепи не превышает допустимого значения. Не хватает одной вершины. Выполняем пункт 15 алгоритма. Получаем новую оценочную матрицу меньших размеров, представленную в таблице 4. В матрице имеется пять ветвей на дереве решений с одинаковой оценкой 1: 1-7, 7-2, Б-1, ФБ-1 и 5-6. Необходимо рассмотреть вычеркивание всех вариантов. В качестве примера рассмотрим удаление хорды Б-1. Новая оценочная матрица представлена в таблице 5, где ячейка 1-3 заблокирована против заикливания. В последней строке выполнена операция приведения. Наибольшую оценку имеет ветвь ФБ-6, поэтому она удаляется. Остается матрица размером 4x4 элемента, таблица 6. Здесь блокируем ячейку 6-1 против образования цикла. Две ветви: 1-7 и 7-2 имеют одинаковую оценку 1. В качестве примера включаем хорду 1-7 в маршрут. Выполняем пункт 11. Получены цепи: 2-4-8-ФБ-6 и Б-1-7. В каждой и них имеется менее 4 вершин разгрузки груза. Пункт 13 алгоритма не выполняется. Переходим в 15 пункт и удаляем в таблице 6 ветвь 1-7.

Таблица 4

Оценочная матрица

	1	2	3	5	6	7
1		1	1	5	5	1 0
5	5	4	0 0		1 0	0 0
6	5	1	0 0	0 0		4
7	0 0	1 0	0 0	0 0	4	
Б	1 0	7		4	1	5
ФБ	1 0			4	1	5

Таблица 5

Оценочная матрица

	2	3	5	6	7
1	1	∞	5	5	1 0
5	4	0 0		0 0	0 0
6	1	0 0	0 0		4
7	1 0	0 0	0 0	4	
ФБ			3	3 0	4

Таблица 6

Оценочная матрица

	2	3	5	7
1	1		5	1 0
5	4	0 0		0 0
6	∞	0 0	0 0	4
7	1 0	0 0	0 0	

Получаем оценочную таблицу 7, в которой блокируем ячейку 7-3 против заикливания. Наибольшую оценку имеют ветви: 5-3 и 7-2. При включении хорды 7-2 в маршрут образуется цепь: Б-1-7-2-4-8-Б с пятью вершинами разгрузки. Этот вариант отбрасываем.

Если вычеркнуть сначала ветвь 5-3, то получаем тот же вариант. Таким образом, пункт 13 алгоритма выполняется. Необходимо заблокировать ячейку 5-3 в таблице 7 и возвратится в пункт 8 алгоритма. Получаем таблицу 8, в которой хорды 5-2 и 6-3 имеют максимальные оценки. Их поочередное включение в маршрут приводит к превышению количества вершин в цепи более 4. Это превышает ограничение.

Таблица 7

Оценочная матрица

	2	3	5
5	4	4 0	
6		0 0	0 0
7	4 0	∞	0 0

Если заблокировать в таблице 7 клетку 7-2, то также получаем превышение ограничения по числу вершин в цепи. Возвращаемся в таблицу 6 и блокируем в ней ячейку 1-7, согласно пункту 13 алгоритма. Получаем оценочную таблицу 9. Максимальные оценки имеют хорды 1-2 и 5-7. В качестве примера удалим в таблице 9 ветвь 1-2. Включаем ее в цепь: Б-1-2-4-8-Б, которая удовлетворяет наложенному ограничению. Первое кольцо найдено. Переходим к нахождению второго маршрута. Следовательно, переходим к матрице 3x3, таблица 10. Блокируем ячейку 6-3 против заикливания.

Таблица 8

Оценочная матрица

	2	3	5
5	∞ 0	∞	
6		∞ 0	0 0
7	0		0 0

Таблица 9

Оценочная матрица

	2	3	5	7
1	4 0		4	∞
5	4	0 0		4 0
6		0 0	0 0	4
7	0 0	0 0	0 0	

Таблица 10

Оценочная матрица

	3	5	7
5	0 0		4 0
6	∞	4 0	4
7	0 0	0 0	

Таблица 11

Оценочная матрица

	3	7
5	∞	4 0
7	0 0	

Проверяем вначале вычеркивание в таблице 10 ветви 6-5. Получаем матрицу 2x2, в которой блокируем ячейку 5-3. Здесь хорды 5-7 и 7-3 удаляются однозначно, таблица 11.

Во втором кольце получили четыре пункта разгрузки: ФБ-6-5-7-3-Б. Условие по ограничению пунктов выполняется. Вычеркивание ветви 5-7 в таблице 9 и блокировка ячейки 7-2 в таблице 6 не улучшает ранее найденный маршрут. Отбрасывая фиктивную базу, первый оптимальный маршрут из двух колец есть: первое Б-1-2-4-8-Б, длиной 10 км. и второе Б-6-5-7-3-Б, длиной 15 км. Рассмотрение других вариантов удаления ветвей в таблице 4: 1-7, 7-2, ФБ-1 и 5-6 не изменяет длину всего оптимального маршрута 25 км., но дает второй маршрут передвижения: третье кольцо Б-6-2-4-8-Б, длиной 13 км. и четвертое Б-1-7-5-3-Б, длиной 12 км.

Рассмотрим остальные варианты сочетания контрольных узлов. При контрольных вершинах: 1 и 6, 3 и 6 получаем второй оптимальный маршрут. При остальных их комбинациях получаются худшие варианты.

Переходим ко второму этапу расчета. Делим каждое кольцо из четырех пунктов пополам. Расчет производим аналогично первому этапу. В результате из первого кольца имеем оптимальные варианты: Б 8-4-Б, длиной 8 км. и Б-2-1-Б, длиной 12 км. При расчете второй схемы Б-6-5-7-3-Б получаем варианты колец длиной по 24 км.: Б-7-5-Б и Б-6-3-Б, Б-5-6-Б и Б-7-3-Б. При расчете второго маршрута из третьего кольца найдем следующие два варианта оптимальных схем по 23 км.: Б-8-4-Б и Б-6-2-Б, Б-4-2-Б и Б-8-6-Б. Из четвертого кольца получаем один вариант передвижения: Б-1-7-Б и Б-3-5-Б, длиной 21 км. Таким образом, наименьшая суммарная длина колец из двух пунктов разгрузки составляет 44 км.

Сравним полученные данные с результатами расчета представленного примера по методу Кларка-Райта [9]. Функция выгоды представлена в табл. 12.

Таблица 12

Функция выгоды

1							
2	2						
1	3	3					
0	4	1	4				
2	5	6	2	5			
0	3	3	0	5	6		
2	5	4	1	6	1	7	
0	2	1	4	2	0	1	8

Из таблицы 12 находим маршруты из четырех пунктов: Б-3-5-7-2-Б, длиной 19 км. и Б-6-8-4-1-Б, длиной 17 км. Их общая длина составляет 36 км., что превышает расстояние 25 км., определенное методом дихотомической маршрутизацией. При двух пунктах в кольце получаем следующие схемы передвижения: Б-3-5-Б, Б-2-7-Б, Б-4-8-Б, Б-1-6-Б с общей длиной 48 км. Это значение превышает оптимальное на 4 км.

Выводы

Таким образом, представленная методика дихотомической маршрутизации цепями дает более точный результат по сравнению с методом Кларка-Райта. Отметим, что разработанную методику ввода фиктивных баз и контрольных пунктов, а также алгоритм расчета можно использовать при поиске на каждом этапе более двух колец, но вопрос поиска блокировочных ветвей требует дополнительного исследования.

Библиографический список

1. Подшивалова, К. С. Разделение транспортной сети на радиальные маршруты / К. С. Подшивалова // Материалы Международной научно-практической конференции ; в 2 ч. – Волгоград : ВолгГТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 133–135.
2. Подшивалов, С. Ф. Проектирование маршрутов с контрольной вершиной из разных центров / С. Ф. Подшивалов, К. С. Подшивалова, Ю. В. Родионов // Мир транспорта и технологических машин. – Орел, 2011. – № 1. – С. 25–30.

3. Подшивалова, К. С. Проектирование рациональной схемы движения грузопотоков в интегрированной системе доставки грузов / К. С. Подшивалова, С. Ф. Подшивалов, Ю. В. Родионов // Автотранспортное предприятие. – Орел, 2013. – № 3. – С. 51–56.
4. Родионов, Ю. В. Маршрутизация маятниковых и кольцевых маршрутов между несколькими базами снабжения / Ю. В. Родионов, К. С. Подшивалова, С. Ф. Подшивалов // Вестник Таджикского технического университета. – 2012. – № 1 (17). – С. 79–83.
5. Николин, В. И. Грузовые автомобильные перевозки / В. И. Николин, Е. Е. Витвицкий, С. М. Мочалин. – Омск : Вариант-Сибирь, 2004. – 480 с.
6. Пожидаев, М. С. Алгоритмы решения задачи маршрутизации транспорта : автореф. ... дис. канд. техн. наук / Пожидаев М. С. – Томск, 2010.
7. Прокофьева, О. С. Разработка методики оптимизации развозочных маршрутов : автореф. ... дис. кан. техн. наук / Прокофьева О. С. – Иркутск, 2004.
8. Littl, J. D. C. An algorithm for the traveling salesman problem / J. D. C. Littl, K. G. Murty, D. Sweeney, C. Karel // Operations Research. – 1963. – Vol. 11. – P. 972–989.
9. Clarke, G. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points / G. Clarke, J. W. Wright // Operations Research. – 1964. – Vol. 12. – № 4. – P. 568–581.

Подшивалова Кристина Сергеевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра организации
и безопасности движения,
Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства
E-mail: sharm-08@bk.ru

Podshivalova Christina Sergeyevna

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of organization
and traffic safety,
Penza State University of Architecture
and Construction

Подшивалов Сергей Федорович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра общепрофессиональных
дисциплин,
филиал Военной академии
материально-технического
обеспечения (г. Пенза)
E-mail burobaola@mail.ru

Podshivalov Sergey Fedorovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of general
professional disciplines,
branch of Military Academy of Logistics
(Penza)

УДК 656.135.073

Подшивалова, К. С.

Дихотомическая маршрутизация транспортного графа / К. С. Подшивалова, С. Ф. Подшивалов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 178–187.

МЕТОДЫ УСТОЙЧИВОГО ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СПУСКА ПО УЗЛОВЫМ ПРЯМЫМ¹

А. Н. Тырсин, А. А. Азарян

RESISTANT LINEAR MODEL FITTING METHODS BASED ON THE DESCENT THROUGH THE NODAL STRAIGHT LINES

A. N. Tyrsin, A. A. Azarian

Аннотация. *Актуальность и цели.* При построении линейных моделей во многих случаях приходится сталкиваться со стохастической неоднородностью экспериментальных данных. Это проявляется в нарушении условий теоремы Гаусса-Маркова, в частности наблюдения могут быть засорены грубыми ошибками. В этих условиях оценивание параметров моделей требуется выполнять с помощью устойчивых методов. К их числу относят метод наименьших модулей и обобщенный метод наименьших модулей. Однако известные алгоритмы их реализации являются достаточно эффективными лишь для малых размерностей моделей и ограниченного объема выборок. Цель данного исследования – разработка эффективных вычислительных алгоритмов реализации данных методов, не имеющих ограничений на порядок моделей и объем экспериментальных данных. *Материалы и методы.* Реализация задач была достигнута за счет организации спуска к искомому решению по узловым прямым. Для снижения вычислительных затрат использована особенность узловых прямых – все расположенные на каждой такой прямой узловые точки являются пересечением набора гиперплоскостей, из которых различными является только одна гиперплоскость. *Результаты.* Дан обзор известных методов реализации метода наименьших модулей и обобщенного метода наименьших модулей. Описаны алгоритмы спуска по узловым прямым, позволяющие существенно снизить вычислительные затраты при реализации этих методов. Доказано достижение минимума за конечное число шагов при реализации метода наименьших модулей с помощью спуска по узловым прямым. Реализация обобщенного метода наименьших модулей с помощью спуска по узловым прямым позволяет найти глобальный минимум или близкое к нему решение. *Выводы.* Предложены эффективные алгоритмы реализации метода наименьших модулей и обобщенного метода наименьших модулей при оценивании параметров линейных моделей, основанные на спуске по узловым прямым. Вычислительная сложность этих алгоритмов делает возможной их практическую реализацию для анализа экспериментальных данных и построения многомерных линейных моделей.

Ключевые слова: метод наименьших модулей, обобщенный, линейная модель, регрессия, алгоритм, узловая точка, узловая прямая, гиперплоскость.

Abstract. *Background.* When fitting linear models, in many cases one has to deal with stochastic inhomogeneity of the experimental data. This is manifested in violation of the assumptions of the Gauss-Markov theorem, in particular, observations can contain outliers. Under the circumstances the estimation of the parameters of models is required to perform using resistant methods. Among them are the least absolute deviations method and the generalized method of the least absolute deviations. However, the known algorithms for

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 16-06-00048а.

their implementation are sufficiently effective only for small dimensions of models and a limited sample size. The purpose of this study is the development of effective computational algorithms for the implementation of these methods, which have no limitations on the order of the models and the amount of experimental data. *Materials and methods.* The implementation of the tasks was achieved by the descent to the solution through the nodal straight lines. To reduce computational costs, the feature of nodal straight lines is used – all nodes located on each such straight line are intersections of a set of hyperplanes, of which only one hyperplane is different. *Results.* A review of known methods for realizing the least absolute deviations method and the generalized method of the least absolute deviations is given. The algorithms of descent through the nodal straight lines are described, which allow to significantly reduce the computational costs when implementing these methods. The achievement of a minimum in a finite number of steps when implementing the method of the least absolute deviations based on descent through the nodal straight lines is proved. The implementation of the generalized method of the least absolute deviations by descent through the nodal straight lines allows us to find a global minimum or a solution close to it. *Conclusions.* Effective algorithms for realization of the least absolute deviations method and the generalized method of the least absolute deviations when estimating the parameters of linear models based on descent through the nodal straight lines are proposed. The computational complexity of these algorithms makes possible their practical implementation for the analysis of experimental data and the construction of multidimensional linear models.

Key words: the least absolute deviations method, generalized, linear model, regression, algorithm, nodal point, nodal straight line, hyperplane.

Введение

При исследовании стохастических систем часто используют линейные модели. К этому классу моделей относят линейные регрессионные зависимости, динамические модели авторегрессии и распределенного лага, а также линейные стохастические модели временных рядов (модели авторегрессии, авторегрессии – скользящего среднего).

Модель линейной регрессии имеет вид [1]

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{a} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\mathbf{X} = \{x_{ij}\}_{n \times m} = \begin{pmatrix} 1 & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \dots \\ \mathbf{x}_n \end{pmatrix}$ – заданная матрица;

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^m, \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^n, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^n$$
 – векторы коэффициентов регрес-

сии, измерений и случайных ошибок, соответственно.

Модель авторегрессии и распределенного лага, обозначаемая как $ADL(p, q_1, \dots, q_m)$, записывается в виде [2]

$$y_i = a_0 + \sum_{k=1}^p a_k y_{i-k} + \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^{q_l} b_{lj} x_{l,i-j} + \varepsilon_i. \quad (2)$$

Если в (2) $p = 0$, то получим модель распределенного лага $DL(q_1, \dots, q_m)$

$$y_i = a_0 + \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^{q_l} b_{lj} x_{l,i-j} + \varepsilon_i. \quad (3)$$

При $m = 0$, $a_0 = 0$, имеем модель авторегрессии $AR(p)$

$$y_i = \sum_{k=1}^p a_k y_{i-k} + \varepsilon_i, \quad (4)$$

которая при введении линейной комбинации лагов случайной компоненты будет моделью авторегрессии-скользящего среднего $ARMA(p, q)$

$$y_i = \sum_{k=1}^p a_k y_{i-k} + \varepsilon_i + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{i-j}. \quad (5)$$

Построение конкретной математической модели по имеющимся наблюдениям реализуется с помощью статистических методов оценки ее параметров. Многие задачи, связанные с обработкой статистических данных, решаются в предположении существования достаточной информации об изучаемых объектах, процессах, явлениях и о свойствах, действующих на них возмущений. Для широкого класса задач разработаны методы эффективного оценивания неизвестных параметров с использованием классических методов максимального правдоподобия [3, 4]. В частности, в предположении, что случайные ошибки нормально распределены, методом максимального правдоподобия является метод наименьших квадратов (МНК) [1].

На основе МНК создана целостная система статистической обработки. С учетом простоты реализации он является наиболее распространенным статистическим методом построения линейных моделей. Его использование для оценивания параметров модели (1) требует выполнения ряда предпосылок, называемых условиями Гаусса-Маркова [5]. При их выполнении МНК-оценки параметров модели (1) являются состоятельными и несмещенными. Кроме того, если случайные ошибки имеют нормальный закон распределения, то МНК-оценки модели (1) становятся эффективными. У динамических моделей (2)–(5) условие некоррелированности значений случайной компоненты для различных лагов не выполняется, поэтому МНК-оценки остаются состоятельными и несмещенными.

Использование МНК при нарушении условий Гаусса-Маркова может привести к значительным ошибкам при оценивании параметров, а в случае присутствия в измерениях больших выбросов даже к несостоятельности оценок [5]. В этом случае устойчивость оценок может быть достигнута за счет использования иных методов, самым популярным из которых является метод наименьших модулей (МНМ) [6–9]. МНМ для задачи (1) имеет вид

$$Q(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n |y_i - \langle \mathbf{a}, \mathbf{x}_i \rangle| \rightarrow \min_{\mathbf{a} \in \mathbf{R}^m}. \quad (6)$$

Если выбросы в целом имеют симметричный вид, то для оценивания моделей (1), (3), не использующих в качестве входных переменных лагов вы-

ходной величины, МНМ-оценки обеспечивают приемлемые результаты. Однако при одностороннем характере выбросов наблюдается смещение оценок [10]. Для оценивания моделей (2), (4), (5) в условиях выбросов МНМ уже не обеспечивает состоятельности оценок [8]. В качестве альтернативы в [11] предложен обобщенный метод наименьших модулей (ОМНМ). Без потери общности для удобства будем рассматривать далее модель (1), т.к. остальные линейные модели формально можно свести к выражению (1).

ОМНМ-оценки для задачи (1) находят как решение задачи

$$W(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \rho_i(|y_i - \mathbf{x}_i \mathbf{a}|) \rightarrow \min_{\mathbf{a} \in \mathbf{R}^m}, \quad (7)$$

где $\rho(\cdot)$ – некоторая монотонно возрастающая, дважды непрерывно-дифференцируемая на положительной полуоси функция, причем $\rho(0) = 0$, $\forall t > 0 \quad 0 < \rho'(t) < \infty$, $-\infty < \rho''(t) < 0$.

МНМ и ОМНМ объединяет общее свойство – в обоих случаях решение находится в узловых точках [9, 12].

Введем гиперплоскости $\Omega_i = \Omega(\mathbf{a}, \mathbf{x}_i, y_i)$ в виде уравнений

$$y_i - \langle \mathbf{a}, \mathbf{x}_i \rangle = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (8)$$

Зададим также узловые точки пересечения гиперплоскостей (8)

$$\mathbf{a}_{(k_1, \dots, k_m)} = \bigcap_{i=k_1}^{k_m} \Omega_i, \quad 1 \leq k_1 < k_2 < \dots < k_m \leq n, \quad k_s \in N. \quad (9)$$

Обозначим: $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$ – множество всех гиперплоскостей, U – множество всех узловых точек (9). Поскольку минимум целевых функций $Q(\mathbf{a})$ и $W(\mathbf{a})$ всегда принадлежит множеству U , поэтому точное решение $\mathbf{a}^*$ задач (6) и (7) может быть получено путем перебора всех узловых точек и выбора в качестве решения той, которая обеспечивает минимум целевой функции.

Перебор всех узловых точек требует решения C_n^m систем линейных уравнений порядка m и вычисления значения целевой функции в каждой узловой точке $\mathbf{a}_{(k_1, \dots, k_m)}$. Это означает, что с ростом n и m наблюдается экспоненциальный рост вычислительных затрат. Фактически практическое применение переборного алгоритма ограничено объемом выборки $n < 150$ и числом коэффициентов регрессии $m < 4$.

В настоящее время предложен ряд других методов решения задач (6) и (7). Однако они также для получения точного или близкого к точному решения требуют больших вычислительных затрат.

Постановка задачи

Целью статьи является исследование особенностей задач (6) и (7) для выяснения причин недостаточно высокой скорости сходимости приближенных методов их решения и проблем, связанных с получением точных реше-

ний, а также описание эффективных вычислительных алгоритмов нахождения МНМ- и ОМНМ-оценок линейных моделей.

Обзор методов нахождения МНМ- и ОМНМ-оценок линейных моделей

Эффективный алгоритм поиска минимума целевой функции должен учитывать ее свойства и особенности геометрии. Исследования показали, что у функции $Q(\mathbf{a})$, несмотря на кусочно-линейный вид, очень «плохая» геометрия – она имеет большое число оврагов (равно C_n^{m-1}) в виде прямых, причем эти овраги вытянуты, скрещены и многие из них почти параллельны и находятся на близком расстоянии друг от друга, образуя так называемый «пучок». При этом минимум находится внутри этого «пучка». Стенки этих оврагов представляют собой выпуклые линейные гиперграницы, которые постепенно при приближении к минимуму целевой функции также становятся почти параллельными. В качестве иллюстрации для случая для $m = 2$, $n = 128$ и нормально распределенных случайных ошибок на рис. 1 показаны прямые $y_i - a_1 - a_2 x_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$, на которых расположены все овраги функции $Q(\mathbf{a})$.

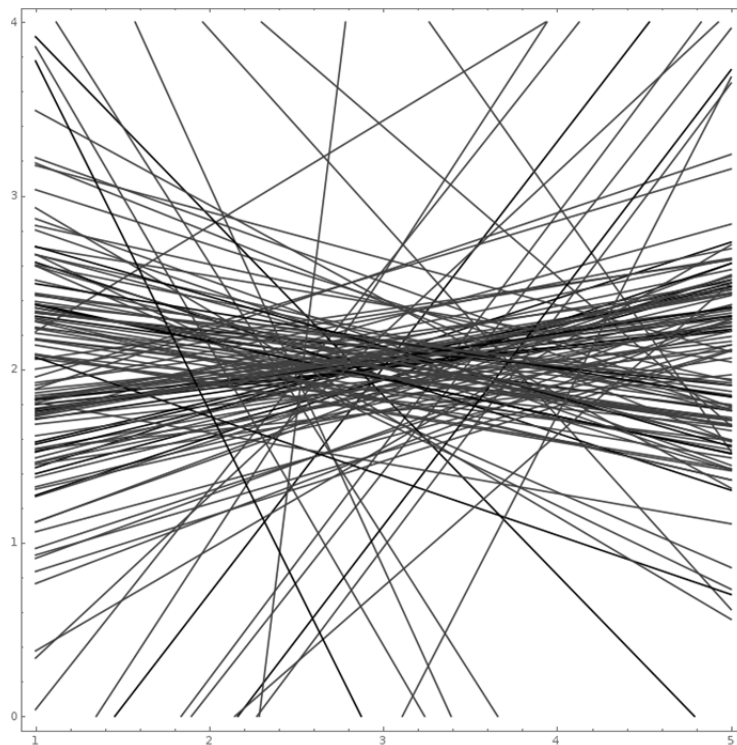


Рис. 1. Графики прямых, на которых расположены все овраги целевой функции $Q(\mathbf{a})$, для случая $m = 2$ и $n = 128$ и нормально распределенных случайных ошибок

Указанная специфика геометрии целевой функции приводят ко многим затруднениям при реализации разных алгоритмов нахождения точного решения задачи (6) на основе идей линейного программирования [7, 13–17]. Все эти алгоритмы основаны на симплекс-методе, либо на различных его моди-

фикациях. Они осуществляют движение по узловым точкам, являющихся базисными решениями.

Но решение задачи линейного программирования ограничено случаем лишь нескольких десятков наблюдений. Это вызвано накоплением погрешностей из-за ошибок округлений. В результате этого процесс движения по базисным решениям может не дать точного решения задачи (6) или даже зациклиться. Кроме того, требуется хранить в оперативной памяти большой массив данных в виде симплекс-таблиц. Использование техники безошибочных вычислений [18], устранив рост вычислительных погрешностей, приведет к существенному усложнению реализации и росту вычислительных затрат.

Во-вторых, при переходе от одной к другой узловой точке указанные алгоритмы не учитывают эту «плохую» геометрию целевой функции.

Объясним почему переходы по симплекс таблицам не эффективны. С учетом специфики самой задачи, а именно того, что овраги целевой функции вытянутые, скрещены и многие из них почти параллельны и находятся на близком расстоянии друг от друга, такие переходы без учета геометрии целевой функции часто могут отдаляться от «пучка» этих гиперплоскостей вида (8), внутри которого лежит точное решение. После чего появляется потребность к возвращению к этому «пучку» гиперплоскостей, а конкретнее к точному решению и для этого осуществляются какие-то спиралевидные неэффективные переходы от одной узловой точки к другой. То есть процесс затягивается, кроме того при этих спиралевидных переходах также накапливаются вычислительные погрешности. Все эти проблемы существенно усиливаются с увеличением размерности модели и объема выборки.

В-третьих, известные алгоритмы недостаточно используют свойство ее выпуклости. А именно, ввиду выпуклости целевой функции спуск к точному решению можно осуществлять по различным направлениям. Поэтому нужно выбирать такие направления спуска, которые не позволяли бы отдаляться от «пучка» гиперплоскостей.

Из приближенных численных методов решения задачи (6) можно отметить метод вариационно-взвешенных квадратических приближений (называемый также алгоритмом Вейсфелда) [7, 19] и методы спуска нулевого порядка [9]. Метод вариационно-взвешенных квадратических приближений не обладает свойством сходимости к точному решению из-за неограниченного возрастания нескольких весовых коэффициентов, а предложенная регуляризация существенно ограничивает точность приближенного решения. Кроме того, с ростом m и n резко снижается скорость сходимости алгоритма в окрестности минимума целевой функции. Методы нулевого порядка просты и эффективны с вычислительной точки зрения. Однако они оказались чувствительны к «плохой» геометрии целевой функции, особенно при увеличении размерности модели m . В процессе перехода от одного приближенного решения к другому, происходит перескок на другой «овраг», который может проходить в стороне от точного решения, что с учетом близости к нулю градиента целевой функции в точках дифференцируемости часто приводит к несостоятельности оценок свободного члена, а значит и вектора $\mathbf{a}$ в целом. Чтобы избежать этого, необходимо значительно повысить точность алгоритма, а это приведет к росту вычислительных затрат.

Анализ известных решений показал, что их основной недостаток состоит в не учете овражности и близости к нулю градиента целевой функции в точках дифференцируемости в достаточно большой окрестности ее минимума. Поскольку целевая функция выпуклая, то спуск у овражной функции наиболее эффективен по ее «оврагам». Но этими «оврагами» являются отрезки прямых (назовем их узловыми прямыми), образованных пересечением гиперплоскостей (8). Таким образом, спускаясь по узловым прямым, мы устраняем все указанные выше проблемы известных методов решения задачи (6).

Целевая функция $W(\mathbf{a})$ также имеет овраги, расположенные вдоль узловых прямых. Кроме того она является вогнутой (выпуклой вверх) и имеет множество локальных минимумов, расположенных в узловых точках, что существенно затрудняет нахождение точного решения задачи (7). Поэтому итерационный алгоритм [20, 21], основанный на идеях линейного программирования, весьма трудоемок и не гарантирует сходимости к точному решению задачи. В [22] для уменьшения вычислительных затрат предложена модификация ОМНМ, основанная на разбиении исходной выборки на подвыборки и формировании множества оценок по всем подвыборкам. В данном случае повышение точности оценивания достигается за счет осреднения полученных оценок и повторного случайного формирования подвыборок. Это приводит к росту вычислительных затрат. Данный алгоритм также не гарантирует получения точного решения задачи (7).

У целевой функции $W(\mathbf{a})$ глобальный минимум также находится в узловой точке, и она имеет вытянутые «овраги», расположенные на узловых прямых. Поэтому поиск глобального минимума функции $W(\mathbf{a})$ также следует осуществлять по узловым прямым.

Реализация МНМ на основе спуска по узловым прямым

Обычный спуск. Данный алгоритм точного решения задачи (6) основан на спуске к точному решению, двигаясь вдоль узловых прямых $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$, каждая из которых является пересечением $(m-1)$ различных гиперплоскостей Ω_i :

$$l_{(k_1, \dots, k_{m-1})} : \bigcap_{i=k_1}^{k_{m-1}} \Omega_i, \quad 1 \leq k_1 < k_2 < \dots < k_{m-1} \leq n, \quad k_s \in N.$$

В качестве начального приближения берется узловая точка $\mathbf{a}_{(k_1, \dots, k_m)}$, являющаяся пересечением m произвольных различных гиперплоскостей $\Omega_{k_1}, \dots, \Omega_{k_m}$. Исключив одну из гиперплоскостей, получим узловую прямую $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$. Через любую узловую точку проходит m узловых прямых. Выберем из этих узловых прямых ту, вдоль которой целевая функция достигает наименьшего значения, которое всегда будет достигаться в одной из узловых точек. Найдя эту узловую точку, продолжим движение из нее по тому же принципу. В результате будет найдена узловая точка $\mathbf{a}_{(k_1, \dots, k_m)}^* = \mathbf{a}^*$, спуск из которой невозможен. Эта узловая точка будет являться точным решением задачи (6). В основе алгоритма лежат следующие теоремы.

Теорема 1. Рассмотрим модель (1), для которой имеется выборка наблюдений $(\mathbf{x}_i, y_i) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}, y_i)$, $(i = 1, \dots, n)$, и пусть заданы функция $Q(\mathbf{a})$ задачи (6), гиперплоскости (3) и множество U всех узловых точек (9). Тогда, функция (2) всегда имеет точку глобального минимума, эта точка либо единственна и принадлежит U , либо состоит из выпуклого линейного многогранника, вершины которого являются точками из U .

Доказательство теоремы 1. Известно, что выпуклая, непрерывная, кусочно-линейная функция либо имеет глобальный минимум, либо стремится к минус бесконечности. А поскольку функция $Q(\mathbf{a})$ является также ограниченной снизу ($Q(\mathbf{a}) \geq 0$, как сумма модулей) функцией, то она всегда имеет точку глобального минимума.

Пусть $\mathbf{a}^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_m^*)^T$ – стационарная точка и является точкой минимума функции $Q(\mathbf{a})$. Тогда ее градиент в этой точке равен нулю. Поскольку $Q(\mathbf{a})$ кусочно-линейная функция, то из равенства $\text{grad} Q(\mathbf{a}^*) = \mathbf{0}$ следует, что функция $Q(\mathbf{a})$ является постоянной функцией на выпуклом многограннике с вершинами $\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2, \dots, \mathbf{a}^l$, гранями которого являются гиперплоскости (8), имеющие вид [23]

$$A = \{\mathbf{a} : \mathbf{a} = \sum_{k=1}^l \lambda_k^2 \mathbf{a}^k, \sum_{k=1}^l \lambda_k^2 = 1\}.$$

Функция $Q(\mathbf{a})$ является постоянной до граничных точек многогранника A , лежащих на гиперплоскостях (3). Следовательно, вершины $\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2, \dots, \mathbf{a}^l$ этого многогранника являются узловыми точками и функция $Q(\mathbf{a})$ достигает минимума и в этих точках.

Все гиперплоскости (9), и только они, являются особыми точками функции $Q(\mathbf{a})$, поскольку только в них она не дифференцируема. Если взять $(m-1)$ произвольных невырожденных соотношений вида $l_i = y_i - \langle \mathbf{a}, \mathbf{x}_i \rangle = 0$, то они в совокупности определяют прямую

$$l_{(k_1, \dots, k_{m-1})} : \bigcap_{i=k_1}^{k_{m-1}} \Omega_i, \quad k_i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (10)$$

в пространстве $(a_1, a_2, \dots, a_m)$ и вместе с тем плоскость $P_{(Q, k_1, \dots, k_{m-1})}$, параллельную оси Q в пространстве $(Q, a_1, a_2, \dots, a_m)$. Присоединяя к системе (10) выражение (6) и рассматривая их совместно, найдем уравнение ломанной M , полученной в результате пересечения поверхности (6) плоскостью $P_{(Q, k_1, \dots, k_{m-1})}$.

Если с помощью уравнений, входящих в систему (10) выразить $(m-1)$ неизвестных $a_1, a_2, \dots, a_{m-1}$ через оставшееся неизвестное и подставить в выражение (6), то получим уравнение проекции ломанной M на плоскость $\mathcal{T}(Q, a_m)$ (рис. 2). Точки $T_{i_1}, T_{i_2}, \dots, T_{i_{n-m+1}}$ являются проекциями на эту плоскость точек пересечения прямой $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$ гиперплоскостями (8), не вошедшими в (10).

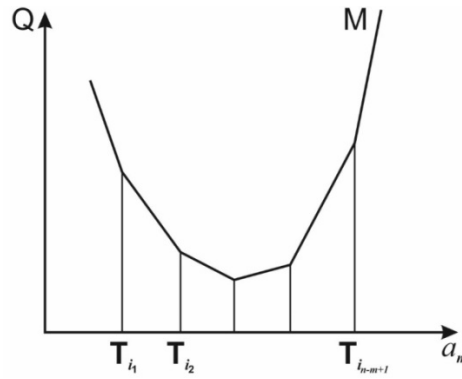


Рис. 2. Вид функции $Q(a_m)$

Функция $Q(a_m)$ на плоскости (Q, a_m) – выпуклая и кусочно-линейная с особыми точками $T_{i_1}, T_{i_2}, \dots, T_{i_{n-m+1}}$, которые являются узловыми точками. Отсюда следует, что функция $Q(\mathbf{a})$ достигает минимума в узловой точке.

Теорема 2. Алгоритм спуска вдоль узловых прямых для нахождения решения задачи (6), сходится к точному решению за конечное число шагов.

Доказательство теоремы 2. На каждом шаге алгоритма мы находим узловую точку с все меньшим значением целевой функции, а поскольку количество узловых точек конечно, то алгоритм выполняется за конечное число шагов.

Докажем, что алгоритм всегда будет достигать минимума целевой функции (т.е. решения). Допустим, что мы находимся на k -м шаге алгоритма, в какой-то узловой точке и пытаемся осуществить спуск вдоль одной из m узловых прямых, проходящих через эту точку, к другой узловой точке с меньшим значением целевой функции. Покажем, что либо мы сможем найти такую точку, либо текущая узловая точка является минимальной.

Целевая функция $Q(\mathbf{a})$ является выпуклой функцией в пространстве $\mathbf{R}^m$. Поэтому, если взять произвольную точку $\tilde{\mathbf{x}}$ и m линейно независимых прямых $\tilde{l}_j$, ($j=1, 2, \dots, m$), проходящих через нее, то либо найдется такая окрестность этой точки, в которой целевая функция будет убывать хотя бы вдоль одного из направлений, либо в текущей узловой точке достигается минимум целевой функции.

Поскольку вероятность того, что случайная величина (случайные погрешности) более одного раза примет одно и то же значение равна нулю, то узловые прямые, проходящие через узловую точку, являются линейно независимыми. То есть вдоль одной из них целевая функция убывает, причем она будет убывать вплоть до следующей узловой точки на этой узловой прямой, поскольку между двумя соседними узловыми точками, целевая функция (2) будет линейна, так как все ее подмодульные выражения не будут менять знак. Действительно, смена знака означает пересечение одной из образующих гиперплоскостей, что приведет к образованию узловой точки, а мы рассматриваем часть узловой прямой между двумя соседними узловыми точками.

На практике из-за конечной точности измерений гипотетически могут возникнуть ситуации, когда узловые прямые, проходящие через узловую

окажутся параллельными. В этом случае узловой точки не существует, и переходим к рассмотрению другой узловой прямой.

Таким образом, либо произвольная узловая точка является минимумом целевой функции, либо хотя бы по одной из проходящих через нее узловых прямых можно сделать переход к узловой точке с меньшим значением целевой функции. Теорема доказана.

Отметим, что при вычислительные затраты данного алгоритма можно значительно сократить, если использовать информацию о предыдущей найденной узловой точке.

Спуск с использованием разреженных матриц. Двигаясь вдоль прямой $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$, для нахождения узловых точек, принадлежащих этой прямой, нужно для каждой точки решать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) порядка m

$$\begin{cases} a_1 + a_2 x_{k_1,2} + a_3 x_{k_1,3} + \dots + a_m x_{k_1,m} = y_{k_1}, \\ a_1 + a_2 x_{k_2,2} + a_3 x_{k_2,3} + \dots + a_m x_{k_2,m} = y_{k_2}, \\ \dots \\ a_1 + a_2 x_{k_{m-1},2} + a_3 x_{k_{m-1},3} + \dots + a_m x_{k_{m-1},m} = y_{k_{m-1}}, \\ a_1 + a_2 x_{i,2} + a_3 x_{i,3} + \dots + a_m x_{i,m} = y_i, \end{cases} \quad (11)$$

где $1 \leq k_1 < k_2 < \dots < k_{m-1} \leq n$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $i \notin \{k_1, k_2, \dots, k_{m-1}\}$.

Очевидно, что СЛАУ двух различных узловых точек, принадлежащих этой прямой одной прямой отличаются лишь одним (последним) уравнением. Следовательно, вычислительная эффективность алгоритма спуска существенно повысится, если для нахождения узловых точек, которые лежат на прямой $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$, первые $(m-1)$ строк расширенной матрицы, соответствующей СЛАУ (11) предварительно преобразуем с помощью элементарных преобразований к ступенчатому виду. Расширенная матрица СЛУ прямой $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$ имеет вид

$$\mathbf{A}_{(k_1, \dots, k_{m-1})} = \begin{pmatrix} 1 & x_{k_1,2} & x_{k_1,3} & \dots & x_{k_1,m-1} & x_{k_1,m} & y_{k_1} \\ 1 & x_{k_2,2} & x_{k_2,3} & \dots & x_{k_2,m-1} & x_{k_2,m} & y_{k_2} \\ 1 & x_{k_3,2} & x_{k_3,3} & \dots & x_{k_3,m-1} & x_{k_3,m} & y_{k_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{k_{m-1},2} & x_{k_{m-1},3} & \dots & x_{k_{m-1},m-1} & x_{k_{m-1},m} & y_{k_{m-1}} \end{pmatrix}.$$

Применив алгоритм прямого хода метода Гаусса, преобразуем матрицу $\mathbf{A}_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$ к ступенчатому виду

$$\mathbf{A}'_{(k_1, \dots, k_{m-1})} = \begin{pmatrix} 1 & x_{k_1,2} & x_{k_1,3} & \dots & x_{k_1,m-1} & x_{k_1,m} & y_{k_1} \\ 0 & 1 & x'_{k_2,3} & \dots & x'_{k_2,m-1} & x'_{k_2,m} & y'_{k_2} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & x'_{k_3,m-1} & x'_{k_3,m} & y'_{k_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & x'_{k_{m-1},m} & y'_{k_{m-1}} \end{pmatrix}.$$

Используя ступенчатую матрицу $A'_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$ можно значительно сократить вычислительные затраты на нахождение всех узловых точек, лежащих на прямой $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$. Действительно для каждой искомой узловой точки имеем расширенную матрицу

$$A_{(k_1, \dots, k_{m-1}, i)} = \begin{pmatrix} 1 & x_{k_1,2} & x_{k_1,3} & \dots & x_{k_1,m-1} & x_{k_1,m} & y_{k_1} \\ 0 & 1 & x'_{k_2,3} & \dots & x'_{k_2,m-1} & x'_{k_2,m} & y'_{k_2} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & x'_{k_3,m-1} & x'_{k_3,m} & y'_{k_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & x'_{k_{m-1},m} & y'_{k_{m-1}} \\ 1 & x_{i,2} & x_{i,3} & \dots & x_{i,m-1} & x_{i,m} & y_i \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Варьируя номер i в (12), найдем все узловые точки, лежащие на прямой $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$.

Вычислительная эффективность алгоритма спуска можно повысить, если учитывать направление спуска.

Спуск с использованием разреженных матриц и с учетом направления спуска. Используя ступенчатую матрицу $A'_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$, и решив СЛАУ, соответствующую расширенной матрице (12), находим значение m -го коэффициента $a_m^{(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}, i)}$, $1 \leq k_1 < k_2 < \dots < k_{m-1} \leq n$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $i \notin \{k_1, k_2, \dots, k_{m-1}\}$, для каждой узловой точки. После чего по возрастанию $a_m^{(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}, i)}$ упорядочиваем все узловые точки, которые лежат на прямой $l_{(k_1, \dots, k_{m-1})}$, и выполняем описанный выше алгоритм спуска, но с учетом направления. Если при непосредственном переходе от одной узловой точки к другой значение целевой функции увеличивается, то в этом направлении значение целевой функции будет увеличиваться во всех узловых точках (вытекает из выпуклости целевой функции). Назовем такое направление «плохим». Для осуществления спуска, до вычисления значения целевой функции в очередной узловой точке рассматриваем направление спуска. Если оно «плохое», то переходим к следующей точке, не вычисляя в данной узловой точке, ни значение целевой функции, ни значения коэффициентов $a_j^{(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}, i)}$, $j = 1, 2, \dots, m-1$.

В [24] доказано, что алгоритм спуска по узловым прямым имеет вычислительную сложность $W = O(m^2 n^2 + m^4 n \ln n + m^2 n \ln^2 n)$. Отметим, что для $n > \max(\ln^2 n; m^2 \ln n)$ вычислительная сложность спуска по узловым прямым $W = O(m^2 n^2)$.

Нахождение ОМНМ-оценок линейных моделей на основе спуска по узловым прямым

Для реализации идеи неполного перебора узловых точек необходима априорная информация о примерном расположении точного решения $\mathbf{a}^*$ зада-

чи (7). Многочисленные вычислительные эксперименты методом статистических испытаний Монте-Карло [25] показали, что вектор $\mathbf{a}^*$, как правило, мало отличается от решения задачи (7) методом наименьших модулей, равного

$$\mathbf{a}^{(0)} = \arg \min_{\mathbf{a} \in \mathbb{R}^m} \sum_{i=1}^n |y_i - \langle \mathbf{a}, \mathbf{x}_i \rangle|. \quad (13)$$

Описанный выше алгоритм реализации МНМ на основе спуска по узловым прямым имеет число операций порядка $O(m^2 n^2)$. Это пренебрежимо мало по сравнению с затратами на реализацию полного перебора узловых точек.

Алгоритм решения задачи (7) также основан на использовании узловых прямых и состоит в следующем.

1. Используем в качестве начального приближения $\mathbf{a}^{(1)}$ узловую точку решение $\mathbf{a}^{(0)}$ задачи (13) методом наименьших модулей, т.е. считаем $\mathbf{a}^{(1)} = \mathbf{a}^{(0)}$.

2. Уточняем решение путем спуска из узловой точки $\mathbf{a}^{(1)}$, поочередно двигаясь вдоль каждой из m узловых прямых, проходящих через $\mathbf{a}^{(1)}$. Выберем ту узловую точку, в которой целевая функция $W(\mathbf{a})$ достигает наименьшего значения. Найдя эту точку, продолжим движение из нее по тому же принципу. В результате будет найдена узловая точка $\mathbf{a}^{(2)}$, спуск из которой невозможен. При движении вдоль узловой прямой используем ступенчатые расширенные матрицы вида (12).

3. Для найденной узловой точки $\mathbf{a}^{(2)}$ определим множество гиперплоскостей $\Omega(\mathbf{a}^{(2)}) \subset \Omega$, состоящее из $\alpha \cdot 100\%$ гиперплоскостей, наименее удаленных от $\mathbf{a}^{(2)}$.

Каждая из гиперплоскостей (8) включают в себя случайную ошибку. Ошибки группируются относительно нуля, чем меньше ошибка, тем меньше гиперплоскости отличаются друг от друга. Решение обычно лежит в узловых точках, образованных гиперплоскостями с малыми величинами ошибок. Все эти гиперплоскости будут располагаться в пространстве очень «тесно».

4. С помощью перебора среди всех узловых точек, получаемых в результате пересечения гиперплоскостей из множества $\Omega(\mathbf{a}^{(2)})$ находим ту точку $\mathbf{a}^{(3)}$, в которой целевая функция принимает наименьшее значение.

5. Найденную узловую точку $\mathbf{a}^{(3)}$ сравниваем с начальным приближением $\mathbf{a}^{(1)}$. Если они совпадают, то работа алгоритма останавливается и в качестве решения задачи (2) берется полученная узловая точка. В противном случае в качестве начального приближения $\mathbf{a}^{(1)}$ берем полученную узловую точку, переходим к п. 2 и повторяем вышеописанные действия.

Пример. Для нескольких значений n и m проведем исследование описанного алгоритма. Считаем для определенности, что случайная ошибка распределена по стандартному нормальному закону распределения. Воспользуемся методом Монте-Карло. Число испытаний зададим равным 1000. В качестве функции потерь используем $\rho(|x|) = \arctg|x|$.

В табл. 1 приведено отношение вычислительных затрат переборного алгоритма к затратам предложенного алгоритма спуска по узловым прямым.

Таблица 1

Отношение вычислительных затрат переборного алгоритма к затратам предложенного алгоритма спуска по узловым прямым

n	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
32	7,2	40,4	202,5
64	46,0	414,4	3961,6
128	158,4	1157,9	6203,2
256	222,1	1273,4	6875,0
512	225,4	1339,3	7363,6

Алгоритм спуска по узловым прямым показал высокую точность. В частности, для $m = 3$, $n = 128$ в 995 случаях из 1000 полученное решение совпало с точным решением по переборному алгоритму. В остальных пяти случаях средняя относительная погрешность по сравнению с точным решением составила 0,11 %.

Заключение

1. Предложены эффективные алгоритмы реализации метода наименьших модулей и обобщенного метода наименьших модулей при оценивании параметров линейных моделей, основанные на спуске по узловым прямым.
2. Данные алгоритмы позволяют значительно снизить вычислительные затраты по сравнению с переборным алгоритмом.
3. Вычислительная сложность спуска по узловым прямым позволяет на практике реализовать предложенные алгоритмы для анализа экспериментальных данных.

Библиографический список

1. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: исследование зависимостей / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
2. Суслов, В. И. Эконометрия / В. И. Суслов, Н. М. Ибрагимов, Л. П. Талышева, А. А. Цыплаков. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2005. – 744 с.
3. Кендалл, М. Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стьюарт ; пер. с англ. – М. : Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1973. – 900 с.
4. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1975. – 648 с.
5. Демиденко, Е. З. Линейная и нелинейная регрессия / Е. З. Демиденко. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
6. Bloomfield, P. Least absolute deviations: theory, applications, and algorithms / P. Bloomfield, W. L. Steiger. – Boston-Basel-Stuttgart : Birkhauser, 1983. – 349 p.
7. Мудров, В. И. Методы обработки измерений. Квазиправдоподобные оценки / В. И. Мудров, В. Л. Кушко. – М. : Радио и связь, 1983. – 304 с.
8. Болдин, М. В. Знаковый статистический анализ линейных моделей / М. В. Болдин, Г. И. Симонова, Ю. Н. Тюрин. – М. : Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1997. – 288 с.

9. Тырсин, А. Н. Оценивание линейных регрессионных уравнений с помощью метода наименьших модулей / А. Н. Тырсин, К. Е. Максимов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 7. – С. 65–71.
10. Тырсин, А. Н. Робастное построение линейных регрессионных моделей по экспериментальным данным / А. Н. Тырсин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – Т. 71, № 11. – С. 53–57.
11. Тырсин, А. Н. Робастное построение регрессионных зависимостей на основе обобщенного метода наименьших модулей / А. Н. Тырсин // Записки научных семинаров ПОМИ. – 2005. – Т. 328. – С. 236–250.
12. Тырсин, А. Н. Оценивание линейной регрессии на основе обобщенного метода наименьших модулей / А. Н. Тырсин, Л. А. Соколов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2010. – № 5 (21). – С. 134–142.
13. Fisher, W. D. A note on curve fitting with minimum deviations by linear programming / W. D. Fisher // Journal of the American Statistical Association. – 1961. – Vol. 56. – P. 359–362.
14. Barrodale, I. An improved algorithm for discrete L1 linear approximation / I. Barrodale, F. D. K. Roberts // SIAM Journal on Numerical Analysis – 1973. – Vol. 10. – P. 839–848.
15. Narula, S. C. Algorithm AS108: Multiple linear regression with minimum sum of absolute errors / S. C. Narula, J. F. Wellington // Applied Statistics. – 1977. – Vol. 26. – P. 106–111.
16. Armstrong, R. D. Algorithm AS132: Least absolute value estimates for a simple linear regression problem / R. D. Armstrong, D. S. Kung // Applied Statistics. – 1978. – Vol. 27. – P. 363–366.
17. Wesolowsky, G. O. A new descent algorithm for the least absolute value regression problem / G. O. Wesolowsky // Communications in Statistics, Simulation and Computation. – 1981. – Vol. B10, № 5. – P. 479–491.
18. Грегори, Р. Безошибочные вычисления. Методы и приложения / Р. Грегори, Е. Кришнамурти. – М. : Мир, 1988. – 208 с.
19. Weiszfeld, E. On the point for which the sum of the distances to n given points is minimum / E. Weiszfeld // Annals of Operations Research. – 2008. – Vol. 167. – P. 7–41. Translated from the French original [Tohoku Mathematics Journal. – 1937. – Vol. 43. – P. 355–386] and annotated by Frank Plastria.
20. Панюков, А. В. Взаимосвязь взвешенного и обобщенного вариантов метода наименьших модулей / А. В. Панюков, А. Н. Тырсин // Известия Челябинского научного центра. – 2007. – № 1 (35). – С. 6–11.
21. Панюков, А. В. Об устойчивом оценивании параметров авторегрессионных моделей на основе обобщенного варианта метода наименьших модулей / А. В. Панюков // Вестник НГУЭУ. – 2015. – № 4. – С. 339–346.
22. Тырсин, А. Н. Об одном алгоритме реализации обобщенного метода наименьших модулей / А. Н. Тырсин, А. А. Азарян // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2017. – Т. 24, В. 4. – С. 375–376.
23. Рокафеллар, Р. Выпуклый анализ / Р. Рокафеллар ; пер. с англ. – М. : Мир, 1973. – 470 с.
24. Тырсин, А. Н. Точные алгоритмы реализации метода наименьших модулей на основе спуска по узловым прямым / А. Н. Тырсин, А. А. Азарян // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. – 2017. – № 4. – С. 21–32.
25. Ермаков, С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы / С. М. Ермаков ; 2-е изд., доп. – М. : Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1975. – 472 с.

Тырсин Александр Николаевич

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой прикладной
математики,
Уральский энергетический институт,
Уральский федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина
E-mail: at2001@yandex.ru

Tyrsin Alexander Nikolayevich

doctor of engineering science, associate
professor, head of sub-department of
applied mathematics,
Ural power engineering Institute,
Ural Federal University named after the
first President of Russia B.N. Yeltsin

Азарян Алексан Артурович

аспирант,
Уральский энергетический институт,
Уральский федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина
E-mail: a.a.azaryan@gmail.com

Azaryan Alexan Arturovich

Postgraduate student,
Ural power engineering Institute,
Ural Federal University named after the
first President of Russia B.N. Yeltsin

УДК 519.237.5:519.24

Тырсин, А. Н.

Методы устойчивого построения линейных моделей на основе спуска по узловым прямым / А. Н. Тырсин, А. А. Азарян // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 188–202.

**КЛАСТЕР НОМЕНКЛАТУРЫ ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫХ
ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСКРОЯ
МЕТАЛЛОПРОКАТА**

Е. В. Федорина, И. Ф. Дьяков

**NOMENCLATURAL CLUSTER OF SHEET STAMPING
PARTS FOR DESIGNING OF METAL CUTTING**

E. V. Fedorina, I. F. Dyakov

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время применяется большое количество программ по раскрою различного листового и рулонного материала стандартной и произвольной формы из металла, стекла, древесины, ткани, меха и т.д. Программы хорошо себя зарекомендовали при резке на современном специальном оборудовании с помощью управляющих программ в условиях единичного и мелкосерийного производства, когда необходимо оптимально раскроить на листе различные детали (групповой раскрой). В крупносерийном и массовом производстве, характеризующемся индивидуальным раскромом и наличием других важных показателей раскроя, эти программы имеют ограниченное применение. Для реализации задачи автоматизированного раскроя в условиях такого производства необходимо создание новой системы или расширение использования применяемых систем. Для принципиально нового подхода к проектированию раскроя необходимо создание основных справочников: по деталям, оборудованию и металлопрокату. Ввиду отсутствия работ по классификации деталей с точки зрения раскроя разделение деталей является наиболее сложным этапом. Цель исследования – формирование базы данных для программного обеспечения проектирования оптимального раскроя. *Материалы и методы.* Для реализации поставленной задачи проанализирована номенклатура холодноштамповочных деталей прессового производства, сформированы каталоги заготовок и отходов, выявлены отличительные признаки, представлен классификатор деталей для создания справочника, необходимого при проектировании раскроя. *Результаты.* Создана база данных в MS Access «Кластер деталей «ПРОМ-2013», в которой представлена информация о поддетальном раскроме металла. Результатом работы новой базы данных является «карта раскроя материала». *Выводы.* В разработанной базе данных накапливается информация о поддетальном раскроме, которая дает возможность систематизировать данные раскроя и осуществлять поиск необходимой информации. Карты раскроя позволяют получить наглядное изображение раскроя и быстро оценить результаты.

Ключевые слова: оптимальный раскрой, ресурсоэкономичный показатель, классификация деталей, маршрут переработки листового металла, холодноштамповые детали.

Abstract. *Background.* Currently used a large number of different programs for cutting the sheet and roll material, both standard and arbitrary shape from a metal, glass, wood, fabric, fur, etc. The programs proved to be good for cutting on modern special equipment with the help of control programs in single and small batch production, when it

is necessary to cut the sheet optimally to different billets (group cutting). In mass and large production, characterized by individual cutting and the presence of other important cutting parameters, these programs have limited application. To realize the task of automated cutting in the conditions of such production, it is necessary to create a new system or expand the use of the applied systems. For a fundamentally new approach to designing cutting need to create basic directories: on details, equipment and rolled metal. In the absence of work on the classification of parts from the point of view of cutting, the separation of parts is the most difficult stage. The purpose of the research is the formation of a database for software for designing optimal cutting. *Materials and methods.* For realization of the task, the nomenclature of parts for cold stamping was analyzed, catalogs of blanks and wastes were formed, distinctive features were revealed, the classifier of details was presented to create the directory necessary for designing the cutting. *Results.* In MS Access the database «Cluster of details PROM-2013» was created, in which information about the cutting of metal is presented. The result of the work of the new database is the «map for cutting material». *Conclusions.* The developed database accumulates information about the cutting, which makes it possible to systematize the cutting data and to search for the necessary information. Cards for cutting allow you to get an idea of cutting and quickly evaluate the results.

Key words: optimal cutting, resource-saving coefficient, classification details, route for sheet metal processing, cold-formed parts.

Введение

Эффективность машиностроительного производства определяется снижением потребляемого металлопроката, затраты на который в себестоимости выпускаемой продукции составляют значительную часть. Поэтому проблеме повышения эффективности производства необходимо решать в двух направлениях: с одной стороны снижать металлоемкость, а с другой – использовать менее дорогую металлопродукцию за счет поиска альтернативных поставщиков проката.

Одной из задач повышения эффективности использования металла является совершенствование технологии раскроя, которое можно осуществить двумя способами:

1. Улучшение действующих технологических процессов. Для этого крайне важно систематически проводить анализ потерь и отходов металла, образующихся на производстве, что позволит вскрыть причины нерационального использования металла и определить резервы снижения металлоемкости.
2. Проектирование новых передовых технологий. Необходимо разрабатывать прогрессивные металлосберегающие технологии и обеспечивать практическое внедрение их в производство.

Основными потребителями металлопродукции является машиностроительные комплексы. Потребление металла в отраслях машиностроения оценивается более чем 50 млн т в год [1]. К ограничителям роста металлопотребления относится политика ценообразования производителей металлопродукции. Цена одной тонны металла составляет несколько десятков тысяч рублей. Даже незначительное снижение потребления металла или расходов на металл принесет огромную экономическую пользу.

Важнейшим резервом экономии металла является рациональный раскрой проката [1, 2]. В качестве исходных материалов для листовой штамповки используют листы, рулоны, ленты, специальные полосы и др. Резка металлопроката осуществляется на заготовительных участках в цехах-потребителях проката или выделена в самостоятельное раскройно-заготовительное производство. Маршруты переработки листового проката отличаются многообразием и зависят от масштаба производства, имеющегося на предприятии технологического оборудования, условий поставки исходного материала, размеров штампуемых деталей и других факторов [3]. Возможная последовательность переработки листопрката по разным направлениям показана на рис. 1.

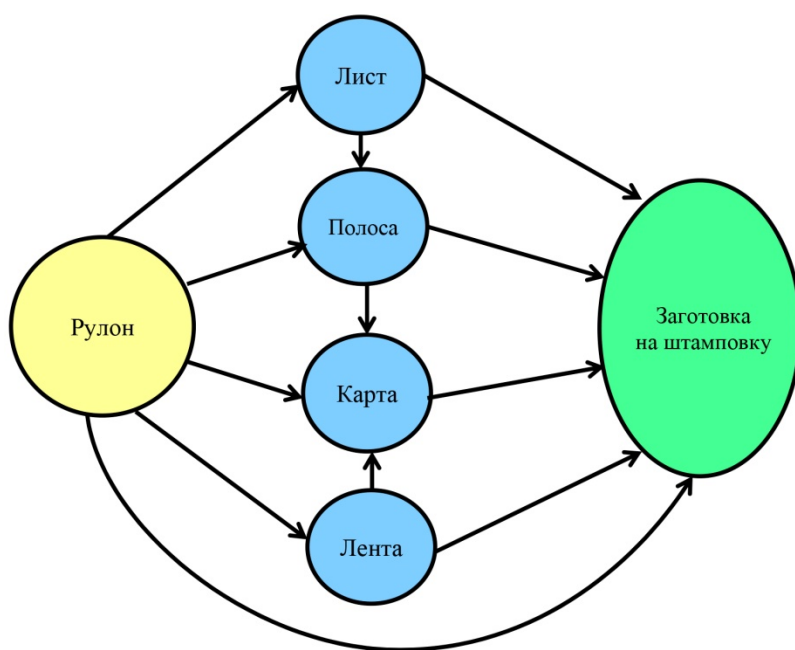


Рис. 1. Возможные маршруты раскроя

В настоящий момент заказ листового и рулонного материала ведется с учетом двух главных задач:

1. Определение минимальной потребности металла, исходя из имеющегося на автомобильных заводах сортамента;
2. Формирование сортамента металла под габариты основных металлоемких деталей.

Традиционная схема проектирования технологических процессов листовой штамповки (рис. 2), включающая этап раскроя исходных материалов, не позволяет произвести оптимальный раскрой всей номенклатуры штампуемых деталей, т. к. расчет базируется на определении наиболее рационального использования металла, соответствующего максимальному КИМ и минимальному потреблению материала [1, 2] по каждой детали в отдельности. На рис. 3,а представлен алгоритм поддетального расчета раскроя металла.



Рис. 2. Существующая схема проектирования раскроя

Раскрой листового и рулонного металлопроката на полосы и штучные заготовки для штамповки деталей является основой ресурсосбережения заготовительного производства. Показатели эффективности раскроя – норма расхода, коэффициент использования металла (КИМ), коэффициент раскроя металла (КРМ) – относятся к важным натуральным характеристикам экономичности реализуемых процессов на предприятии. Натуральные показатели нужны для материально-вещественного выражения объема производимой продукции (т, кг, м, шт. и др.), необходимых ресурсов, оборудования, формирования плана производства, плана снижения издержек.

Однако, монополизация в поставке металла при отсутствии альтернативных поставщиков металлопроката, субъективное предпочтение какому-либо одному производителю и бесконтрольный рост цен практически сводят к нулю стремление уменьшить норму расхода штампуемых деталей и получить экономию.

Новые подходы к решению задач раскроя

В связи со сложившимися производственными условиями на металлургических комбинатах и предприятиях, перерабатывающих листовую металлопрокат, при разработке раскроя предлагается учитывать динамику изменения политики цен, что сказывается на увеличении себестоимости изделий, т.к. затраты на металл могут составлять до 90 % [3]. Кроме того, информация о прокате не только в натуральном, но и в стоимостном выражении позволяет более детально анализировать затраты в части экономного использования металлопроката. Применение стоимостных показателей наряду с натуральными позволят также дать более эффективную экономическую оценку деятельности предприятия [4]. Существует взаимосвязь между натуральными и стои-

мостными характеристиками. Стоимостные показатели определяются на основе натуральных показателей. В то же время стоимостная оценка затрат способствует более рациональному применению ресурсов и подъему эффективности производства.

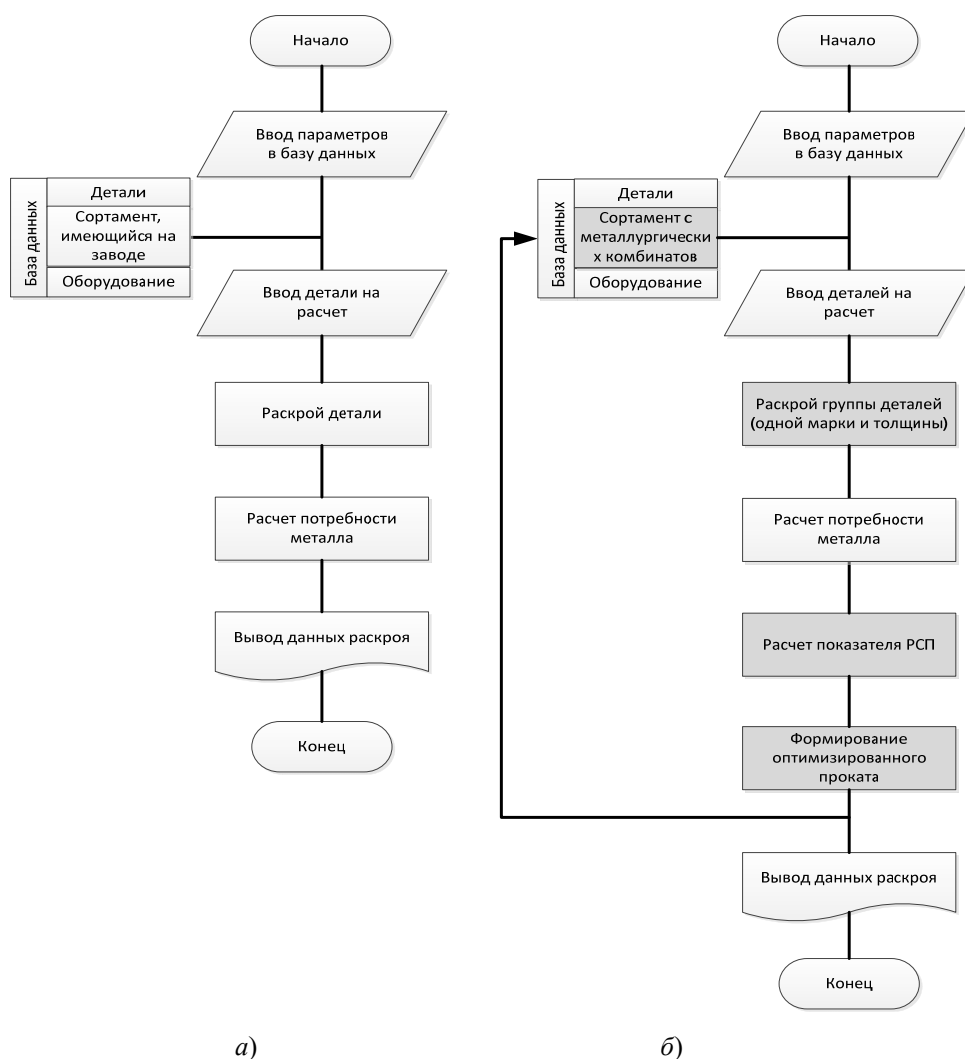


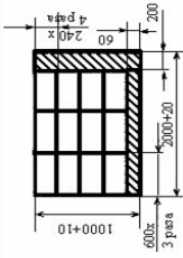
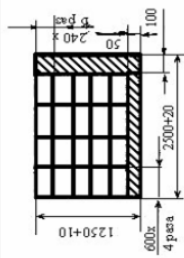
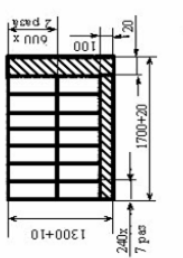
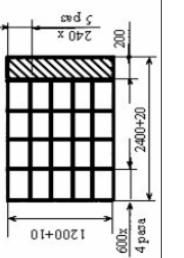
Рис. 3. Алгоритм расчета раскроя металлопроката

Для повышения экономичности раскроя необходимо располагать информацией о сортаменте (типоразмерах) металлопроката, производимого металлургическими комбинатами. В случае экономической целесообразности номенклатуру типоразмеров проката необходимо расширять и систематизировать.

Кроме того, расширение списка альтернативных поставщиков металлопроката дает возможность увеличить перечень сортамента металла, подлежащего раскрою. При этом может сложиться такая ситуация, когда при выборе выгодного раскроя будет отдано предпочтение варианту не с минимальными нормой расхода или с минимальной ценой стали, а с минимальными затратами на металл.

Таблица 1

Варианты раскроя заготовки из предлагаемого металлургическими комбинатами сортамента

№п/п	Наименование поставщика	Габариты листового металлопроката	Схема раскроя	Вес листа с учетом половины допуска на размеры, кг	Количество деталей из листа, шт.	Масса детали, кг	Норма расхода, кг	КИМ	Цена 1 кг металла, руб.	Затраты по металлу на 1 дет., руб.
1	Металлургический комбинат №1	Лист 1,0х1000х2000		15,818	12	1,000	1,318	0,759	20,1	26,495
2	Металлургический комбинат №2	Лист 1,0х1250х2500		24,728	20	1,000	1,236	0,809	20,1	24,852
3	Металлургический комбинат №3	Лист 1,0х1300х1700		17,518	14	1,000	1,251	0,799	19,8	24,775
4	Металлургический комбинат №4	Лист 1,0х1200х2600		24,688	20	1,000	1,234	0,810	20,22	24,960

В качестве примера в табл. 1 представлены четыре возможных варианта раскроя заготовки с размерами 240×600 мм для штамповки детали массой 1 кг при наличии четырех условных поставщиков четырех типоразмеров листового металла с разной ценой. Анализируя табличные результаты, можно сделать выводы, что наименьшая норма расхода 1,234 кг и наибольшее значение КИМ 0,81 соответствует раскрою по варианту № 4. Однако, минимальные затраты по металлу на 1 деталь составляют 24,775 руб. по варианту № 3 при норме расхода 1,251 кг (не наименьшее значение) и КИМ 0,799 (не наибольшее значение). В рассмотренном примере разница в затратах по вариантам № 3 и № 4 на 1 деталь составляет 0,185 руб. Не трудно подсчитать, что при программе 100 тыс. штук затраты изменятся на 18,5 тыс. руб., а для годового выпуска производства в 1000 наименований деталей разница составит 18,5 млн руб. [5].

Поэтому для оценки эффективности работы холодноштамповочных производств и, в частности, заготовительных участков, занимающихся раскроем металлопроката, предлагается использовать сочетание нескольких показателей с определением комплексного показателя затрат или ресурсостоймостного показателя (РСП).

Из многообразия предлагаемых альтернативных решений по возможному варианту раскроя металла выбор будет осуществляться с помощью нового показателя в пользу максимально выгодного с точки зрения минимальных финансовых затрат. Применение комплексного показателя в качестве основного при определении рационального раскроя с помощью математических методов позволит получать ежегодную экономию порядка 3–5 % от затрат на металлопрокат.

С целью снижения потерь и экономии металла предлагаются современные подходы к решению задач заготовительного производства:

1. Формирование оптимального (по габаритам и объему) сортамента металлопроката происходит за счет соблюдения монтажности нормы поставки не менее 25–30 тонн; ведения расчета одновременно для всей группы деталей, изготавливаемых из данного материала (марки и толщины), что позволяет рационально подбирать отходы на другие детали данной группы; унификации листового и рулонного сортамента, приводящей к дальнейшему сокращению заказываемой номенклатуры металла и к возможности более гибких действий при заказе.

2. Заказ оптимизированного сортамента (технологически и экономически обоснованного) для номенклатуры листоштампованных деталей следует осуществлять на базе анализа сортамента металлургических комбинатов с учетом уровня их цен на необходимый металлопрокат, что позволит минимизировать финансовые затраты.

3. Необходимо введение изменяющихся норм расхода металла, что потребует систематических перерасчетов в зависимости от меняющейся номенклатуры заказываемого металлопроката и использования отходов раскроя крупногабаритных деталей для штамповки изделий меньших размеров.

Норма расхода направлена на формирование минимальной стоимости заготовки (детали). Меняющаяся норма должна стать новой концепцией при

проектировании раскроя, направленной на совершенствование принимаемых решений на начальном этапе производства листоштамповочных деталей – резке заготовок с целью минимизации целевой функции – минимальных затрат и создания ресурсосберегающей технологии.

Для оптимального раскроя одновременно всей номенклатуры деталей и минимизации финансовых средств в расчетах необходимо учитывать не только популярные технико-экономические показатели, но и современные, не менее значимые факторы, такие, как программа деталей, цена металла.

В связи с этим предлагается новая схема проектирования раскроя (рис. 4) и алгоритм расчета раскроя по новой схеме (на рис. 3,б), которые основаны на использовании предложенного комплексного показателя эффективности РСП. В схему и алгоритм введена обратная связь с процессом заказа металла и сортаментом, выпускаемым металлургическими комбинатами, с указанием цены на металл. При обновлении базы данных по металлу и изменении производственных условий оптимизационный расчет по раскрою повторяется по циклу до достижения наилучшего результата РСП. В этом случае нормы расхода станут более «прозрачными», активными, динамично изменяющимися в условиях современного производства.



Рис. 4. Предлагаемая схема проектирования раскроя

Для реализации принципиально нового подхода к проектированию раскроя рассмотрена номенклатура деталей (1900 шт.) одного из штамповочных цехов ульяновского автомобильного завода. Детали были разбиты на группы по различным классификационным признакам. По результатам анализа предложен классификатор деталей, который в дальнейшем станет основой справочника деталей и базой для программного продукта по оптимальному раскрою металлопроката «ПРОМ-2013».

Кластеризация холодноштампуемых деталей при проектировании раскроя металлопроката

В зависимости от эксплуатационного назначения и формы установки в автомобиль холодноштампуемые детали разделяются на детали кузовной, рамной и арматурной штамповки. Детали кузовной штамповки устанавливаются в «черный» (неокрашенный) кузов. Детали рамной и арматурной штамповки – в окрашенный кузов. Такое разделение по назначению (рис. 5) позволит закрепить изготовление деталей за специализированными цехами, совместить резку металла и штамповку в одном цехе и сократить транспортные расходы и расходы на погрузочно-разгрузочные работы.

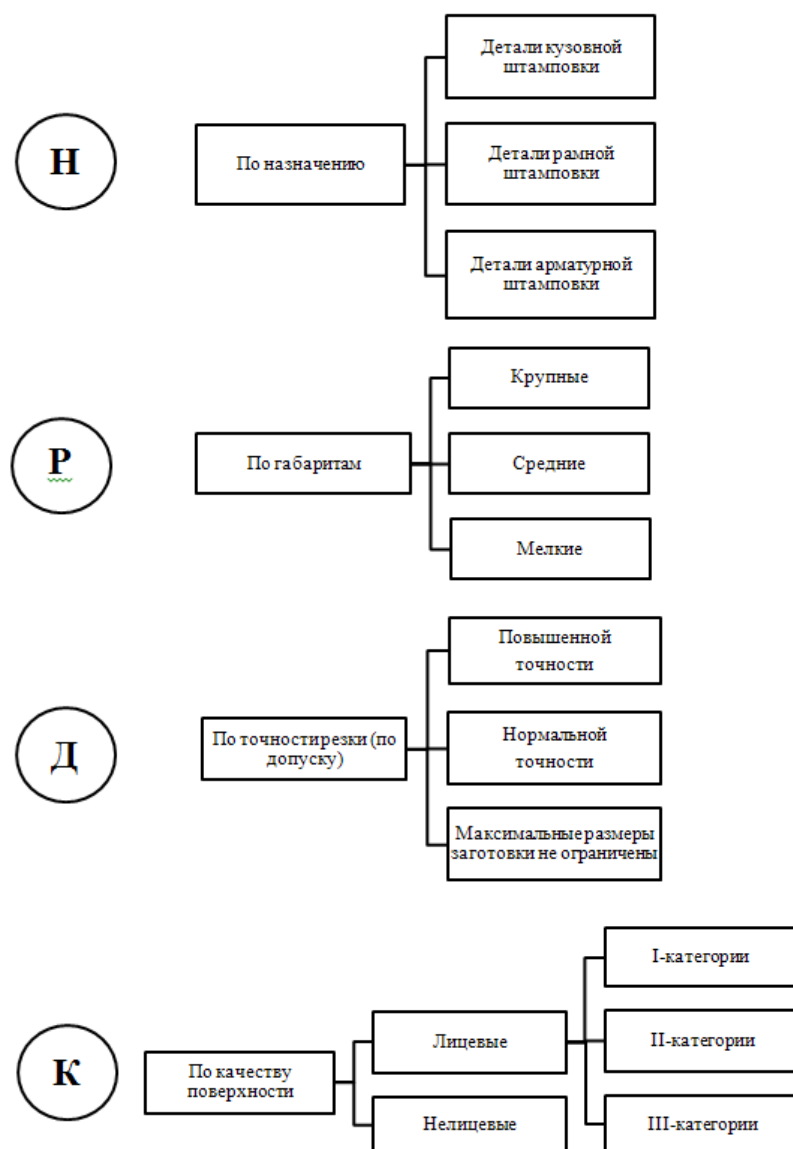


Рис. 5. Классификатор холодноштампуемых деталей по назначению – Н, габаритам – Р, точности резки – Д, качеству поверхности – К

По габаритам детали холодноштамповочного производства бывают крупные, средние, мелкие (см. рис. 5). Для листоштамповочных цехов с разной специализацией подобное деление зависит от размеров заготовок (деталей), которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Классификация холодноштампуемых деталей
в зависимости от размеров заготовок

Цех	Детали по габаритам заготовок		
	крупные	средние	мелкие
Кузовной штамповки	св. 900–2500 мм	св. 400–900 мм	до 400 мм
Рамной штамповки	св. 700–2000 мм	св. 300–700 мм	до 300 мм
Арматурной штамповки	св. 300–500 мм	св. 100–300 мм	до 100 мм

Необходимая точность резки обуславливается технологиями штамповки и раскроя, отклонениями поступающего на раскрой сортамента, техническими возможностями режущего оборудования и экономным использованием металлопроката. Исходя из перечисленных ограничений, разобьем заготовки по точности резки (см. рис. 5):

- повышенной точности, когда номинальный размер заготовки задается с отрицательным отклонением, а при выполнении раскроя требуется дополнительная настройка оборудования и повышенное внимание оператора;
- нормальной точности, когда номинальный размер заготовки задается с симметричными отклонениями $\pm 1,00$ для размеров до 200 мм включительно; $\pm 2,00$ для размеров свыше 200 мм;
- максимальные размеры заготовки не ограничены, возможно применение остатков раскроя (деловых отходов) без дополнительной подрезки.

Градация заготовок по качеству поверхности (см. рис. 5) проведена с учетом требований, предъявляемых к поверхностям кузовных деталей. В зависимости от назначения кузовные автодетали делятся на две основные группы: лицевые и нелицевые.

К лицевым относятся детали трех категорий:

I категория – видимые поверхности всех панелей, образующих внешнюю форму кузова, незакрытых в процессе сборки декоративными деталями (поверхности водосточного желоба, пороги кузова);

II категория – видимые лицевые поверхности и внутренних частей кузова (определяются возможностью их обзора с мест водителя и пассажира при закрытых дверях кузова);

III категория – поверхности кузова, видимые кратковременно при открывании дверей, капота (поверхность проема задней двери).

На лицевой стороне заготовок для этих деталей не допускаются дефекты за исключением отдельных незначительных рисков и царапин длиной менее 20 мм. К нелицевым относятся остальные детали и требования к поверхности заготовок для них не такие жесткие.

По толщине листоштампуемые детали разделим на тонколистовые 0,5–2,0 мм, средней толщины > 2,0 до 4,0 мм, толстые детали > 4,0 до 8,0 мм (рис. 6).

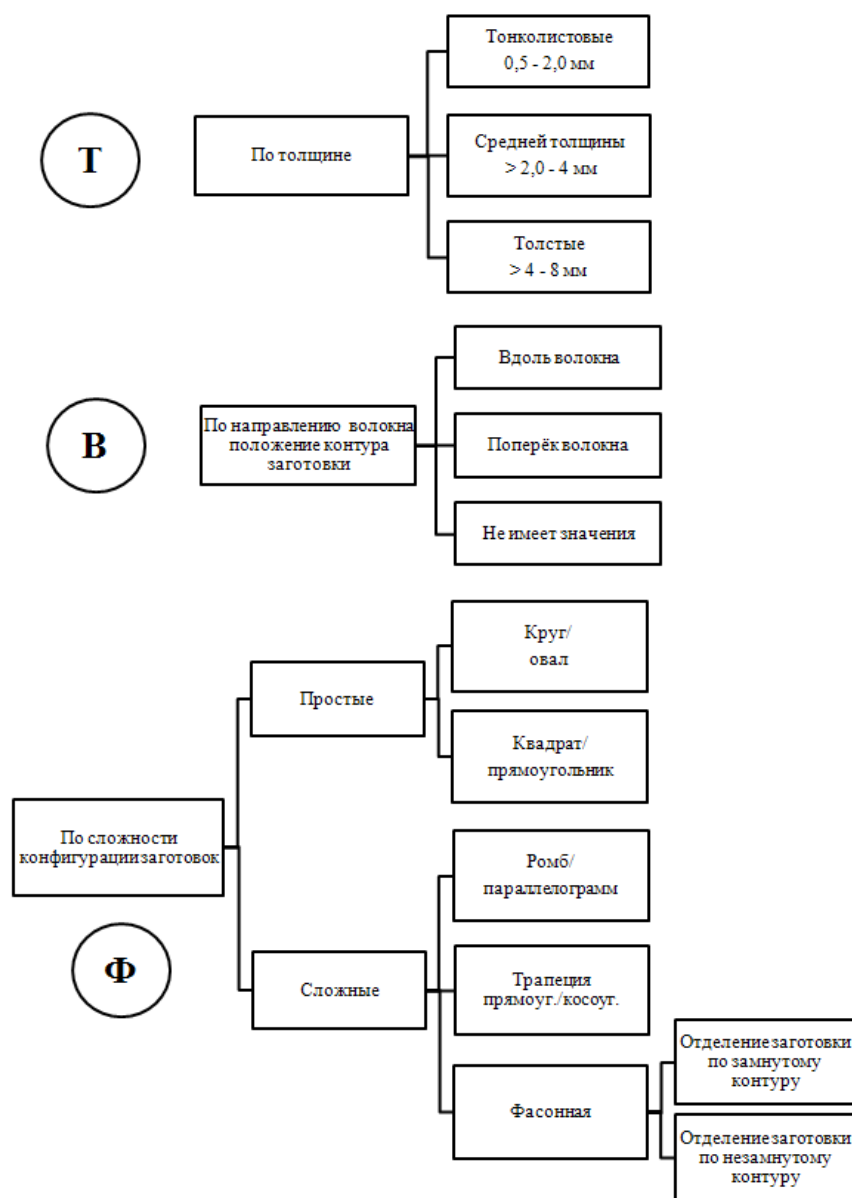


Рис. 6. Классификатор холодноштампуемых деталей по толщине – Т, направлению волокна – В, сложности конфигурации заготовок – Ф

Форма заготовки и ее размеры определяются конструкцией детали, конфигурацией развертки детали, технологическими процессами штамповки и резки. Заготовка представляет собой фигуру, полностью охватывающую развернутую деталь. По форме заготовки бывают простые и сложные (см. рис. 6). К простым формам предлагается отнести заготовки, охватывающие развертку простыми фигурами круг/ овал и квадрат/ прямоугольник. Сложные заготовки облегают развернутую деталь фигурами ромб/ параллелограмм, трапеция. Сложные пространственные геометрии цельноштампованных деталей (каркасы боковин) обуславливают применение более слож-

ных, фасонных заготовок. Контур таких заготовок получают за счет отделения заготовки по замкнутому или незамкнутому контуру с помощью штампов фасонной вырубki и отрезных ножей в виде пакета штампов, режущего оборудования с программным управлением, лазерных установок.

В зависимости от исходного материала классифицируем раскраиваемые изделия на заготовки из основного материала (лист, полоса, рулон, лента) и заготовки из вторичного материала (отхода) (рис. 7). В зависимости от стадии образования отход может быть плоским (при раскрое/штамповке) или пространственным (при штамповке). Когда деловой отход применяется поэтапно несколько раз (отход от отхода), то вводим деление на отходы I рода и отходы II рода.

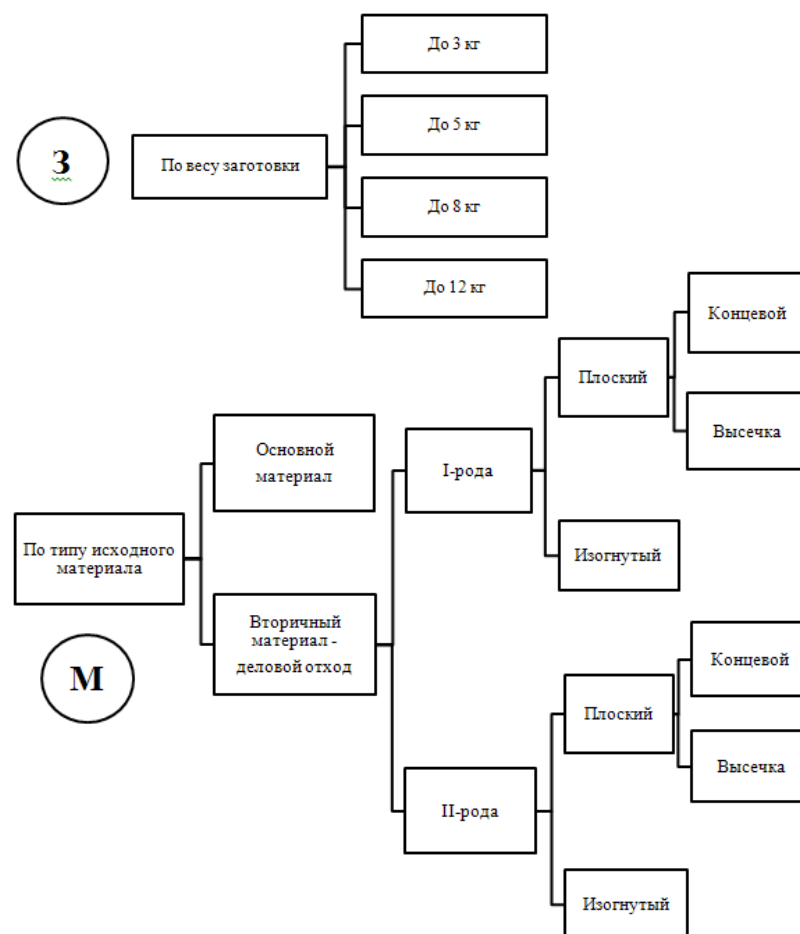


Рис. 7. Классификатор холодноштампуемых деталей по весу заготовки – 3, типу исходного материала – М

С целью соблюдения правил техники безопасности и требований охраны труда при разработке технологии раскроя нередко приходится ограничивать заготовки по весу. Исходя из производственного опыта, зададим четыре группы заготовок по весовой характеристике (см. рис. 7): 1-я группа – до 3 кг, 2-я группа – до 5 кг, 3-я группа – до 8 кг, 4-я группа – до 12 кг.

В зависимости от функционального назначения и возможности получения качественных деталей в процессе холодного листового деформирования расположение контура детали относительно волокон металлопроката может быть трех видов: полоса располагается вдоль линии проката (волокна) (рис. 8,а), поперек линии проката (рис. 8,б) и произвольно по направлению к волокну (рис. 8,в). Во избежание излома металла линию изгиба стремятся расположить под углом, приближенным к 90° к направлению проката (разделение заготовок в зависимости от направления волокна см. рис. 6).

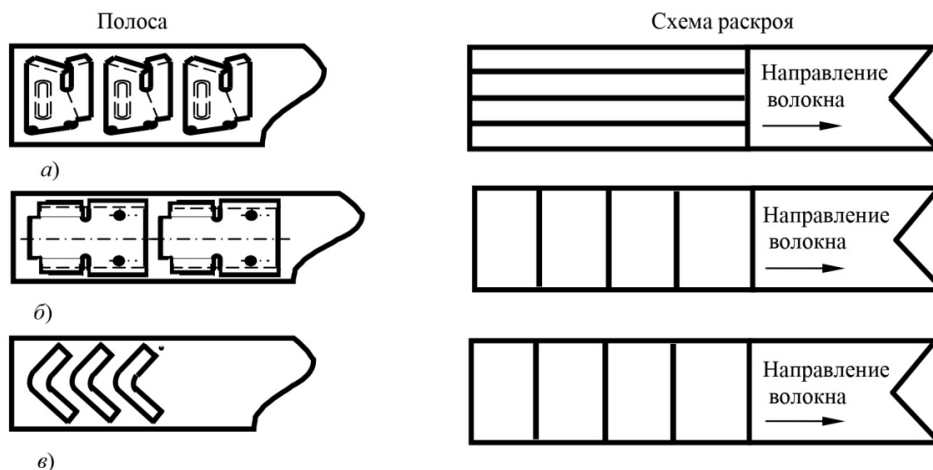


Рис. 8. Положение заготовки и волокна проката

В результате рассмотрения заводской номенклатуры холодноштамповочных деталей созданы каталоги заготовок с привязкой к штамповочным участкам, с описанием технологии раскроя заготовок из металла, технологии раскроя из отхода, с указанием деталей-доноров, деталей-акцепторов, сформированы три основных справочника: по деталям, оборудованию и металлопрокату. На рис. 9 представлены фрагменты из каталога заготовок.

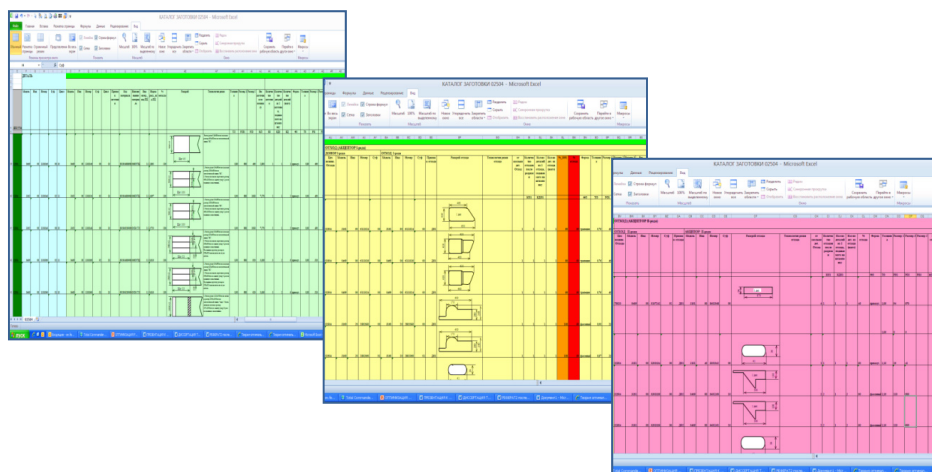


Рис. 9. Фрагменты каталога заготовок

Данная классификация деталей и заготовок определяет структуру базы данных (БД) по деталям для создания новой САПР.

База данных «Кластер деталей ПРОМ-2013»

На основании этой классификации создана и официально зарегистрирована база данных «Кластер деталей «ПРОМ-2013». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620130. Вид и версия системы управления базой данных: Access. Управление всеми данными организовано в одном файле «Кластер деталей «ПРОМ-2013». База данных предназначена для сбора, хранения, систематизации и предоставления оперативной информации о поддетальном раскрое металлопроката, обеспечивает быстрый поиск необходимых данных по номеру детали. Объектами базы данных Access «Кластер деталей «ПРОМ-2013» являются таблицы, формы, запросы и отчеты, имеющие различное назначение.

Вся вводимая информация сохраняется в одиннадцати таблицах, составляющих основу базы данных и предназначенных для определенного типа сведений о холодноштамповочных деталях. Данные из таблиц объединены в формах, запросах, отчетах установленными связями и составляют структуру базы данных «Кластер деталей «ПРОМ-2013» (рис. 10). Установленные связи позволяют контролировать вводимые данные о раскрое деталей во всей базе, добавлять и удалять одноименные записи.

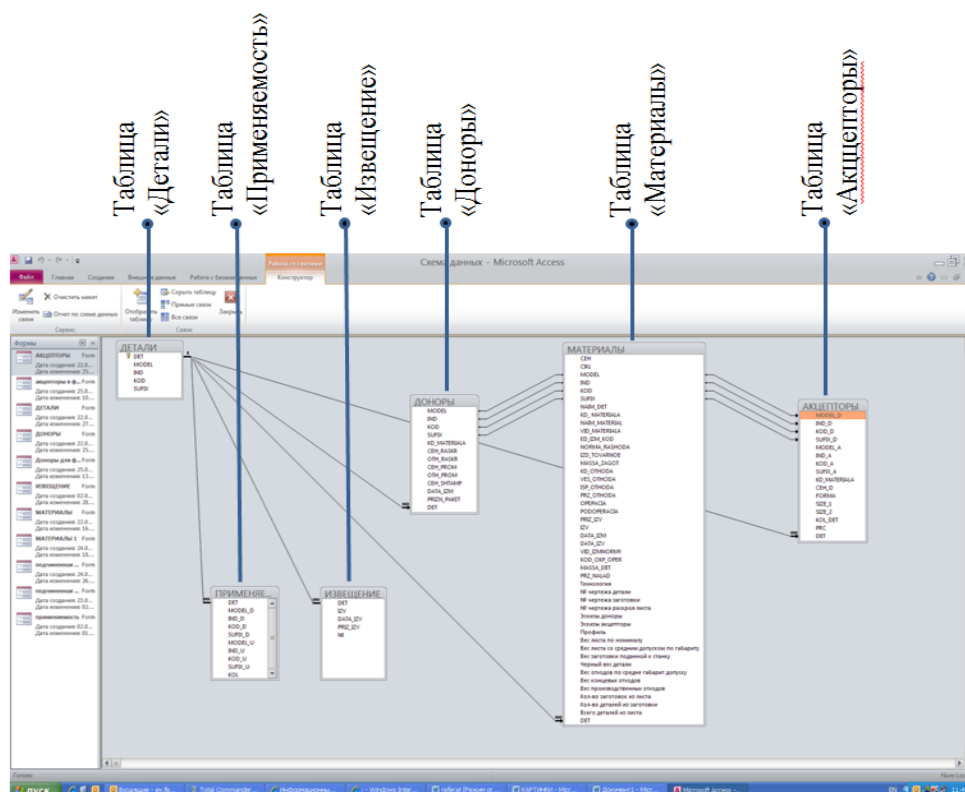


Рис. 10. Структура базы данных

Таблицы (шесть основных и пять вспомогательных) состоят из строк (записей) и столбцов (полей). Уникальным кодом, отличающим одну запись от другой, является номер детали (пятнадцатизначное число). Изменение данных в одной таблице автоматически обновляет сведения во всех формах, т. е. сохраняется целостность БД. Информационный фонд базы данных включает подетальные технико-экономические показатели раскроя, технологию раскроя, сведения о раскраиваемом металле, об образующихся отходах, о деталях-донорах и деталях-акцепторах. Результатом работы спроектированной БД является «Карта раскроя материала». Сформированная карта раскроя содержит информацию о деталях, схему раскроя листа/ рулона, информацию об использовании остатков, параметры выбранного варианта (коэффициент использования материала, коэффициент раскроя материала, процент использования отхода, процент обеспеченности деталей отходом). Карта технической информации раскроя материала создается как на раскрой детали из листа/ рулона, так и на раскрой остатков (рис. 11).

Просмотр и ввод данных осуществляется с помощью форм «Детали», «Материалы», «Доноры», «Акцепторы», «Извещение», «Применяемость».

Для визуализации данных раскроя в карту импортируются дополнительные сведения, созданные в интегрированных с Access приложениях Microsoft Office Word, Excel, PowerPoint, AutoCAD и др. Визуализация данных раскроя с привязкой к картам позволяет быстрее и эффективнее анализировать информацию и принимать экономически обоснованные решения.

Заключение

В процессе исследования разработана новая схема проектирования раскроя, позволяющая в результате циклического оптимизационного расчета (рис. 3) при постоянном обновлении данных по деталям, металлу, оборудованию достигать наилучшего результата нового показателя оптимальности раскроя – РСП и экономить до 3–5 % от годовых затрат на приобретение металла.

В ходе рассмотрения номенклатуры листоштамповочных деталей разработана классификация параметров деталей, подаваемых на раскрой, необходимая для систематизации, автоматизации и ускорения процесса ввода данных параметров, с целью сокращения времени на проектирование раскроя с применением ресурсосберегающих технологий. Полная информация о подетальном раскрое металла представлена в созданной базе данных «Кластер деталей «ПРОМ-2013», выходным документом которой является карта раскроя. Данная база представляет интерес для заготовительных отделений машиностроительных заводов, связанных с раскроем металлопродукции, и может применяться в качестве информационной основы для создания автоматизированных систем проектирования раскроя металла.

Библиографический список

1. Бабаев, Ф. В. Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ / Ф. В. Бабаев. – М. : Машиностроение, 1982. – 168 с.
2. Амбос, Э. Экономия сырья и материалов / Э. Амбос, А. Нойбауер, Ю. Освальд и др. – М. : Metallurgiya, 1989. – 255 с.

3. Ильин, Л. Н. Технология листовой штамповки: учебник для вузов / Л. Н. Ильин, И. Е. Семенов. – М. : Дрофа, 2009. – 472 с.
 4. Ковалев, В. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия : учеб. / В. В. Ковалев, О. Н. Волкова. – М. : ТК Велби, Изд-во Проспект, 2007. – 424 с.
 5. Федорина, Е. В. Моделирование технологических процессов раскроя с целью минимизации затрат / Е. В. Федорина, И. Ф. Дьяков, В. Н. Кокорин // Упрочняющие технологии и покрытия – 2016. – № 4. – С. 39–43.
-

Федорина Елена Викторовна

аспирант,
Ульяновский государственный
технический университет,
ведущий инженер-технолог,
ООО УАЗ
E-mail: ev.fedorina@sollers-auto.com

Fedorina Elena Victorovna

postgraduate student,
Ulyanovsk State Technical University,
senior engineer-technologist,
LLC UAZ

Дьяков Иван Федорович

доктор технических наук, профессор,
кафедра основ проектирования машин
и инженерной графики,
Ульяновский государственный
технический университет
E-mail: i.dyakov@ulstu.ru

Dyakov Ivan Fedorovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of fundamentals of machine
design and engineering graphics,
Ulyanovsk State Technical University

УДК 621.77

Федорина, Е. В.

Кластер номенклатуры листоштамповочных деталей при проектировании раскроя металлопроката / Е. В. Федорина, И. Ф. Дьяков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 203–219.