

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СВЯЗИ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**

## **СТНО-2025**

**VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

**Сборник трудов**

**Том 6**

Рязань  
2025

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5  
С 568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025 [текст]: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025.

**ISBN 978-5-7722-0422-1**

Т.6: – 324 с.,: ил.

**ISBN 978-5-7722-0428-3**

Сборник включает труды участников VIII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025.

В сборнике освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиотехнике, телекоммуникациях, электротехнике и радиоэлектронике, вопросы полупроводниковой наноэлектроники, приборостроения, лазерной, микроволновой техники, силовой промышленной электроники, новые технологии в измерительной технике и системах, биомедицинских системах, алгоритмическое и программное обеспечение вычислительной техники, вычислительных сетей и комплексов, вопросы систем автоматизированного проектирования, обработки изображений и управления в технических системах, перспективные технологии в машиностроительном и нефтехимическом производстве, новые технологии и методики в высшем образовании, в т.ч. вопросы гуманитарной и физико-математической подготовки студентов, обучения их иностранным языкам, перспективные технологии электронного обучения, в том числе, дистанционного, вопросы экономики, управления предприятиями и персоналом, менеджмента, а также вопросы гуманитарной сферы.

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5

**ISBN 978-5-7722-0422-1**

© Рязанский государственный  
радиотехнический университет, 2025

**ISBN 978-5-7722-0428-3**

# **ИНФОРМАЦИЯ О VIII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2025**

VIII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025 состоялся 04.03.2025-06.03.2025 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

«Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и электроника», секции

- Радиотехнические системы и устройства;
- Телекоммуникационные системы и устройства;
- Цифровые информационные технологии реального времени;
- Промышленная силовая электроника, электроэнергетика и электроснабжение;
- Физика полупроводников, микро- и наноэлектроника;
- Микроволновая, оптическая и квантовая электроника;
- Актуальные задачи химических технологий;

«Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника, математическое моделирование и автоматизированные системы», секции

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- ЭВМ и системы;
- Информационные технологии в конструировании электронных средств;
- Модели искусственного интеллекта в САПР;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы и модели в научных исследованиях и прикладных

проблемах;

- Обработка данных, изображений и управление в технических системах;
- Геоинформационные и космические технологии;
- Автоматизация производственно-технологических процессов в приборо- и машиностроении;
- Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине;
- Стандартизация и управление качеством;
- Информационные системы и технологии;

«Современные технологии в науке и образовании. Экономика и управление», секции;

- Современные технологии государственного и муниципального управления;
- Экономика, менеджмент и организация производства;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Экономическая безопасность;
- Финансы и налоги;

«Современные технологии в науке и образовании. Новые технологии и методы в высшем образовании», секции

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования и гуманитарная подготовка студентов;
- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Физико-математическая подготовка студентов;
- Особенности военного образования на современном этапе.

**Организационный комитет Форума:**

Гусев С.И., проректор по научной работе и инновациям, д.т.н., проф.;

Миловзоров О.В., зам. начальника управления организации научных исследований, к.т.н., доц. – координатор, главный редактор сборника трудов Форума;

Миронов Вал.В., профессор кафедры высшей математики, д.ф.-м.н., проф. – ответственный редактор сборника трудов Форума;

Устинова Л.С., начальник отдела информационного обеспечения – отв. за информационную поддержку;

**члены оргкомитета:**

Бабаян П.В., зав. кафедрой автоматики и информационных технологий в управлении, к.т.н., доц.;

Бухенский К.В., зав. кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Витязев В.В., зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, д.т.н., проф.;

Волченков В.А., доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники, к.т.н.;

Горлин О.А., доцент кафедры электронных приборов, к.т.н., доц.;

Губарев А.В., доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, к.т.н., доц.;

Дмитриев В.Т., зав. кафедрой радиоуправления и связи, д.т.н., доц.;

Дмитриева Т.А., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

Евдокимова Е.Н., зав. кафедрой экономики, менеджмента и организации производства, д.э.н., проф.;

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон», д.т.н., проф.;

Есенина Н.Е., зав. кафедрой иностранных языков, к.п.н., доц.;

Жулев В.И., зав. кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., проф.;

Журавлёва Т.А., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Киселёва О.В., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Кислицына Т.С., старший преподаватель кафедры радиотехнических систем;

Клейносова Н.П., директор центра дистанционного обучения, к.п.н., доц.;

Клочко В.К., профессор кафедры автоматики и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Коваленко В.В., зав. кафедрой химической технологии, к.т.н., доц.;

Корячко В.П., зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, д.т.н., проф.;

Костров Б.В., зав. кафедрой электронных вычислительных машин, д.т.н., проф.;

Кошелев В.И., зав. кафедрой радиотехнических систем, д.т.н., проф.;

Крошилина С.В., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

Круглов С.А., зав. кафедрой промышленной электроники, д.т.н., доц.;

Кузьмин Ю.М., доцент кафедры информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Куприна О.Г., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Куприянова М.Н., доцент кафедры экономики, менеджмента и организации производства, к.э.н., доц.

Ленков М.В., декан факультета автоматики и информационных технологий в управлении, зав. кафедрой автоматизации информационных и технологических процессов, к.т.н., доц.

Литвинов В.Г., зав. кафедрой микро- и наноэлектроники, д.ф.-м.н., доц.;

Лукьянова Г.С., доцент кафедры высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Маметова Ю.Ф., доцент кафедры иностранных языков, к.п.н., доц.;

Мельник О.В., профессор кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., доц.;

Меркулов Ю.А., старший преподаватель кафедры автоматизации информационных и технологических процессов;

Миронов В.В., старший преподаватель кафедры Воздушно-космических сил;

Митрошин А.А., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Мищустин В.Г., доцент кафедры микро- и наноэлектроники, к.ф.-м.н., доц.;

Овчакин Г.В., зав. кафедрой вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Паршин А.Ю., доцент кафедры радиотехнических устройств, к.т.н., доц.;

Паршин Ю.Н., зав. кафедрой радиотехнических устройств, д.т.н., проф.;

Перфильев С.В., зав. кафедрой государственного, муниципального и корпоративного управления, д.э.н., проф.;

Подгорнова Н.А., доцент кафедры государственного, муниципального и корпоративного управления, к.э.н., доц.;

Прягогорлинский В.Н., зав. кафедрой информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Пылькин А.Н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.:

Саблина В.А., доцент кафедры электронных вычислительных машин, к.т.н., доц.;

Сапрыкин А.Н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Семенов А.Р., доцент кафедры химической технологии, к.ф.-м.н.;

Скрипкина О.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Соколов А.С., зав. кафедрой истории, философии и права, д.и.н;

Таганов А.И., профессор кафедры космических технологий, д.т.н., проф.;

Тарасова В.Ю., ассистент кафедры электронных вычислительных машин, преподаватель-исследователь;

Торженова Т.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Харитонов А.Ю., нач. военного учебного центра, полковник, к.т.н., доц;

Холопов С.И., зав. кафедрой автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Цыцына М.И., ассистент кафедры космических технологий, магистр;

Чеглакова С.Г., зав. кафедрой экономической безопасности, анализа и учета, д.э.н., проф.;

Челебаев С.В., доцент кафедры автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Шурчкова И.Б., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Щевьев А.А., доцент кафедры истории, философии и права, к.п.н., доц.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ.  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»**

**СЕКЦИЯ «ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ»**

УДК 62-529; ГРНТИ 55.13.15

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ В СТАНКАХ ЧПУ**

**И.А. Зеленин, А.И. Таганов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, ichigur@list.ru*

**Аннотация.** Цель данного анализа - выявление всех возможных алгоритмов решения задач коммивояжёра и исследование моделей и алгоритмов оптимизации, применяемых в программах управления постпроцессоров и технологических автоматов в области числового программного управления. Исследование затрагивает геометрические, кинематические и динамические модели, а также процессуальные и оптимизационные модели, выделяя их роли в достижении эффективных траекторий движения инструмента. Обсуждается интеграция моделей CAD/CAM, адаптивное управление в реальном времени и гибридные подходы, чтобы подчеркнуть их значимость в производственном процессе. Кроме того, в работе исследуются ключевые алгоритмы оптимизации, включая генетические алгоритмы, имитацию отжига, оптимизацию колонии муравьев, оптимизацию роя частиц, поиск по списку табу и дифференциальную эволюцию, разъясняя их применимость для решения вызовов и достижения оптимальных решений в планировании траектории движения инструмента станков с числовым программным управлением.

**Ключевые слова:** числовое программное управление, оптимизация программ управления, траектории движения инструмента, геометрические и кинематические модели, алгоритмы оптимизации.

**OPTIMIZATION OF MOTION TRAJECTORY IN CNC MACHINES**

**I.A. Zelenin, A.I.Taganov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,  
Russian Federation, Ryazan, ichigur@list.ru*

**Annotation.** This extensive analysis aims to identify all possible algorithms for solving traveling salesman problems and examines the models and optimization algorithms used in the control programs of postprocessors and process machines in the field of numerical interleaving (CNC). The study addresses geometric, kinematic and dynamic models, as well as process and optimization models, highlighting their roles in achieving efficient tool paths. CAD/CAM model integration, real-time adaptive control, and hybrid approaches are discussed to highlight their importance in the manufacturing process. Additionally, the abstract explores prominent optimization algorithms, including genetic algorithms, simulated annealing, ant colony optimization, particle swarm optimization, tabu list search, and differential evolution, explaining their applicability to solving challenges and achieving optimal solutions in tool path planning of numerically interleaved machine tools. (CNC).

**Keywords:** numerical interleaving (CNC), optimization of control programs, tool paths, geometric and kinematic models, optimization algorithms.

**Введение**

В области станков с числовым программным управлением оптимизация программ управления играет ключевую роль в повышении эффективности и точности. Настоящая статья посвящена исследованию различных моделей и алгоритмов, используемых для оптимизации программ управления в постпроцессорах и технологических автоматах, с особым ак-

центром на оптимизации траектории движения инструмента в станках с ЧПУ. Общая цель состоит в выявлении и анализе разнообразных алгоритмов, способных решать задачу коммивояжёра в контексте станков с ЧПУ с задачей нахождения кратчайшего пути для перемещений инструмента [1].

### **Важность оптимизационных инструментов**

Эффективные траектории перемещения инструмента являются фундаментальным элементом оптимальной работы станков с ЧПУ, влияя на различные аспекты процесса обработки материалов. Значимость оптимизированного перемещения инструмента можно понять, обратив внимание на следующие ключевые аспекты [2-4]:

1. Эффективность времени
2. Точность и прецизионность
3. Предсказуемость траектории
4. Снижение брака и переработки
5. Энергоэффективность
6. Эффективность программирования и настройки

#### *Эффективность времени*

Оптимизированные траектории движения инструмента уменьшают ненужные перемещения и простои, что приводит к сокращению общего времени обработки. Это напрямую способствует повышению производительности и более быстрому завершению производственных задач.

Эффективные траектории движения инструмента позволяют станкам с ЧПУ уделить больше времени резке и затрачивать меньше времени на непродуктивные перемещения, до максимума увеличивая использование возможностей станка.

#### *Точность и прецизионность*

Оптимизированные траектории движения инструмента обеспечивают более плавные и контролируемые перемещения, уменьшая вероятность отклонения и вибраций инструмента. Это, в свою очередь, способствует улучшению точности резки и производству высококачественных деталей.

Избегая резких изменений направления и ненужных отклонений инструмента, оптимизированные траектории помогают минимизировать износ режущих инструментов. Это увеличивает срок службы инструмента и уменьшает частоту его замены, что способствует экономии затрат.

#### *Предсказуемость траектории*

Оптимизированные траектории движения инструмента обеспечивают предсказуемый и последовательный процесс обработки. Эта предсказуемость крайне важна для производителей, поскольку она позволяет им предвидеть результаты обработки, сокращать ошибки и обеспечивать производство деталей, соответствующих требуемым характеристикам.

#### *Снижение брака и переработки*

Предопределенные траектории движения инструмента помогают уменьшить ошибки и дефекты в обработанных деталях, что приводит к уменьшению количества бракованных или переделываемых продуктов. Это особенно важно для отраслей, где требуется высокая точность, к примеру, аэрокосмическая отрасль или производство медицинских устройств.

#### *Энергоэффективность*

Станки с ЧПУ потребляют энергию во время перемещения инструмента и операций резки. Оптимизированные траектории движения инструмента с минимальными ненужными перемещениями способствуют энергоэффективности за счёт снижения общего энергопо-

требления. Это значимо в рамках устойчивых и экологически осознанных методов производства.

#### *Эффективность программирования и настройки*

Эффективные траектории движения инструмента упрощают процесс программирования для станков с ЧПУ. Упрощённое программирование снижает сложность создания программ управления, что облегчает операторам генерацию кода числового программного управления для выполнения задач обработки материалов.

Оптимизированные траектории движения инструмента часто позволяют использовать более оперативные изменения инструмента и настроек. Эта гибкость особенно полезна в условиях, где частые изменения требований к производству или конфигурациям деталей являются обыденностью.

#### **Трудности в планировании траектории**

Планирование траектории в станках с ЧПУ включает в себя решение ряда проблем, подчёркивающих необходимость использования сложных алгоритмов. Одной из существенных трудностей является сложность обработки деталей с комплексными и неправильными формами, где традиционные методы планирования траектории могут иметь сложности в определении оптимальных траекторий движения инструмента. Сложность геометрии деталей требует применения передовых алгоритмов для обеспечения точности движений инструмента и сокращения времени обработки [5].

Критическим аспектом в планировании траектории является избежание столкновений, поскольку станки с ЧПУ работают в ограниченных рабочих пространствах. Алгоритмы должны динамически корректировать траектории движения инструмента в реальном времени, чтобы предотвращать столкновения между режущим инструментом, заготовкой и другими элементами станка. Обеспечение плавных движений во время всего процесса обработки без столкновений представляет собой достаточно высокий уровень сложности настроек.

Ещё одной проблемой является избежание конфликтов между твёрдостью и характеристиками резки. Алгоритмы планирования траектории должны учитывать эти различия в материалах, чтобы оптимизировать траектории движения инструмента с целью повышения эффективности и продления срока службы инструмента. Более того, достижение плавных траекторий инструмента имеет решающее значение, поскольку резкие изменения направления или скорости могут подвергнуть опасности точность обработки и способствовать ускоренному износу инструмента. В передовых алгоритмах ключевую роль играет создание непрерывных и плавных траекторий движения инструмента, особенно в областях, где высокое качество поверхности является первостепенной задачей.

Динамичная природа рабочих сред также усложняет планирование траектории. Станки с ЧПУ часто работают в средах, где заготовки могут изменяться или перемещаться. Эффективные алгоритмы должны адаптироваться к таким изменениям в реальном времени, обеспечивая оптимальные траектории движения инструмента, несмотря на изменения заготовок.

В области многоступенчатой обработки материалов основной сложностью является управление одновременными движениями по нескольким осям. Алгоритмы планирования траектории должны учитывать сложности, привнесённые станками с несколькими осями, особенно в таких программах, как обработка материалов на 5 осях [6].

Оптимизация траекторий движения инструмента включает в себя сбалансированное соотношение между скоростью и точностью. Алгоритмы планирования траектории должны решать этот вопрос, учитывая конкретные цели минимизации времени обработки при сохранении точности. Вычислительная сложность генерации траекторий инструмента добавляет ещё один уровень сложности, поскольку алгоритмы должны быть эффективными для работы

в реальном времени, особенно в программах, работающих с крупными и сложными моделями [7].

Такие ограничения инструмента, как максимальная глубина реза и пределы оборотов шпинделя, представляют дополнительные трудности. Алгоритмы планирования траектории должны учитывать эти ограничения, чтобы генерируемые траектории были не только оптимальными, но и выполнимыми и безопасными.

## Обсуждение

Оптимизация программ управления для постпроцессоров и технологических автоматов включает использование различных моделей с целью повышения эффективности и производительности производственных процессов. Далее представлен обзор некоторых ключевых моделей, широко используемых в данном контексте [8-12]:

1. Геометрические модели
2. Кинематические модели
3. Динамические модели
4. Модели процесса
5. Оптимизационные модели
6. Эвристические модели
7. Модели машинного обучения
8. Интеграционные модели CAD/CAM
9. Модели адаптивного управления
10. Гибридные модели

### *Геометрические модели (планирование траектории движения инструмента)*

Сфокусированы на физических аспектах процесса обработки, в частности: позиционирование инструмента, заготовки и среды обработки. Основная цель алгоритмов, основанных на геометрических моделях, - оптимизация траектории движения инструмента, учитывая такие факторы, как работа инструмента, компенсация длины инструмента и избежание столкновений.

### *Кинематические модели (планирование движения)*

Сфокусированы на движении и позиционировании компонентов станка, таких как инструмент и заготовка. Эти модели учитывают кинематику станка с ЧПУ с целью оптимизации планирования движения и последующей генерации траектории. Алгоритмы, основанные на кинематических моделях, обеспечивают эффективную работу станка с учетом механических ограничений.

### *Динамические модели (сила резки и вибрации)*

Включают в себя учёт силы резки, вибраций инструмента и других динамических аспектов во время обработки. Эти модели помогают оптимизировать траектории движения инструмента, предсказывая и минимизируя воздействие динамических сил на процесс обработки. Основная задача алгоритмов, основанных на динамических моделях, - повышение стабильности резки и снижение износа инструмента.

### *Модели процесса (удаление материала)*

Сфокусированы на вопросе удаления материала во время обработки. Они учитывают свойства материала, скорость резки и подачи с целью оптимизации программы управления для достижения оптимальных показателей удаления материала. Эти модели способствуют эффективному использованию ресурсов обработки.

*Оптимизационные модели (математическое программирование)*

Используют математические методы для формулирования и решения задач, связанных с оптимизацией программ управления. Линейное программирование, нелинейное программирование и смешанное целочисленное программирование применяются для минимизации времени обработки, износа инструмента или энергопотребления. Эти модели обеспечивают системный подход к поиску оптимальных решений.

*Эвристические модели (генетические алгоритмы, имитация отжига)*

Используют методы эвристического подхода с целью поиска близких к оптимальным решений. Генетические алгоритмы, имитация отжига и другие метаэвристические методы применяются для исследования пространства решений и поиска оптимальных или близких к оптимальным параметров программы управления. Эти модели особенно важны для решения сложных задач оптимизации с большими пространствами решений.

*Модели машинного обучения (предиктивное моделирование)*

Чаще применяются для оптимизации программ управления. Эти модели анализируют исторические данные для прогнозирования оптимальных параметров обработки, траекторий инструмента или конфигураций постпроцессинга. Они способны адаптироваться к изменяющимся условиям и улучшаться с течением времени при наличии дополнительных данных.

*Интеграционные модели CAD/CAM (интеграция программного обеспечения CAM)*

Взаимодействуют с системами компьютерного проектирования (CAD) и компьютерного проектирования и изготовления (CAM). Эти модели обеспечивают точное преобразование идей дизайна в оптимизированные программы управления, упрощая весь процесс производства.

*Модели адаптивного управления*

Фокусируются на стратегиях адаптивного управления, которые могут динамически корректировать программу управления во время обработки. Эти модели используют обратную связь от датчиков для мониторинга условий обработки и вносят мгновенные корректировки, повышая эффективность и точность.

*Гибридные модели (комбинирование нескольких подходов)*

Объединяют элементы различных подходов к моделированию для решения многоограниченных задач оптимизации программ управления. Например, модель может интегрировать геометрические, кинематические и оптимизационные аспекты для достижения комплексного решения.

Исследование оптимизационных алгоритмов является ключевым в контексте планирования траектории инструмента станков с ЧПУ, так как помогает выявить эффективные решения сложных задач оптимизации. Рассмотрим несколько ключевых алгоритмов, обозначая их применимость в решении задач оптимизации, связанных с траекториями инструмента станков с ЧПУ [13-14]:

1. Генетические алгоритмы
2. Алгоритм «Имитация отжига»
3. Алгоритм «Оптимизация колонии муравьёв»
4. Алгоритм «Оптимизация роя частиц»
5. Алгоритм «Поиск по списку табу»
6. Алгоритм «Дифференциальная эволюция»
7. Гибридные алгоритмы

### *Генетические алгоритмы*

Обеспечивают оптимизацию траекторий движения инструмента в станках с ЧПУ и используют массив потенциальных решений, применяя в своей основе такие генетические алгоритмы, как скрещивание и мутация, с целью выявления оптимальных или близких к оптимальным решений. Они могут справляться со сложными нелинейными задачами оптимизации и особенно важны при поиске наиболее оптимального решения при большом количестве вариантов.

### *Алгоритм «Имитация отжига»*

Имитирует процесс отжига в металлургии. Он обеспечивает решение сложных оптимизационных задач. В области числового программного управления обработки материалов алгоритм используется для поиска оптимальных траекторий движения инструмента и минимизации холостого хода режущего инструмента.

### *Алгоритм «Оптимизация колонии муравьёв»*

Имеет в своей основе поведение муравьёв во время поиска добычи; интенсивность феромонов, оставляемых на пути движения, влияет на вероятность выбора другими муравьями аналогичного пути. С течением времени предпочтение отдаётся путям с более высокой концентрацией феромонов. Данный алгоритм обеспечивает оптимизацию траекторий движения инструмента в станках с ЧПУ, с целью поиска эффективных маршрутов путём имитации «феромонного» исследования путей. Это особенно важно в задачах, где пространство решений заранее не полностью известно.

### *Алгоритм «Оптимизация роя частиц»*

Имеет в своей основе социальное поведение птиц и рыб, в частности: популяцию частиц, двигающихся по пространству решений и корректирующих свои положения на основе лучших положений, ранее найденных роем. Данный алгоритм обеспечивает оптимизацию траекторий движения инструмента в станках с ЧПУ, особенно в задачах с большим пространством решений, и позволяет оперативно найти оптимальное решение, а также адаптироваться к изменениям.

### *Алгоритм «Поиск по списку табу»*

Обеспечивает оптимизацию траекторий движения инструмента в станках с ЧПУ при работе с большими пространствами решений, особенно эффективен в решении задач ухода от застревания в локальных минимумах и может применяться как к дискретным, так и к непрерывным задачам оптимизации. Алгоритм использует структуру памяти для предотвращения повторного возврата к определенным решениям (список табу) и основывается на разнообразии в процессе поиска соответствующих решений.

### *Алгоритм «Дифференциальная эволюция»*

Обеспечивает оптимизацию траекторий движения инструмента в станках с ЧПУ в задачах с высокой размерностью. Данный алгоритм известен своей простотой и надёжностью, что делает его подходящим для различных сценариев оптимизации. Алгоритм включает стратегии мутации, скрещивания и выбора с целью системного улучшения решений.

### *Гибридные алгоритмы*

Объединяют элементы различных методов оптимизации для использования их сильных сторон и обеспечивают повышение скорости сходимости и соответствующий уровень качества решений. Они могут быть адаптированы к конкретным задачам оптимизации обработки материалов на станках с ЧПУ, используя преимущества нескольких алгоритмов. Например, гибридный алгоритм может сочетать генетический алгоритм и метод локального поиска с целью проведения наиболее эффективного исследования и последующего использования ресурсов.

## Выводы

Оптимизация программ управления для постпроцессоров и технологических автоматов в области станков с ЧПУ является критическим аспектом повышения эффективности и точности.

Различные модели и алгоритмы, начиная от геометрических и кинематических моделей до оптимизационных и эвристических подходов, играют ключевые роли в достижении оптимальных траекторий движения инструмента.

Преодоление вызовов в планировании траектории, учитывая факторы избежания столкновений и свойств материалов, требует применения сложных алгоритмов.

Интеграция моделей CAD/CAM, адаптивное управление в реальном времени и гибридные подходы дополнительно способствуют оптимизации производственного процесса.

Исследование и применение алгоритмов оптимизации, таких как генетические алгоритмы, имитация отжига, оптимизация колонии муравьев, оптимизация роя частиц, поиск по списку табу и дифференциальная эволюция, предоставляет ценные исследовательские и практические выводы по решению сложных задач оптимизации в планировании траектории движения инструмента станков с ЧПУ.

## Библиографический список

1. Белозёров, В.А., Барбышев, Б.В. Оптимальное управление прочностью режущих частей инструментов из СТМ при точении жаропрочных сплавов на станках с ЧПУ / В.А. Белозёров, Б.В. Барбышев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. – №. 5. – С. 132-139.
2. Белозёров, В.А. Концепция прохождения контактных процессов при точении жаропрочных сплавов инструментами из СТМ / В.А. Белозёров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – №. 3. – С. 122-125.
3. Петунин, А.А., Полищук, Е.Г., Уколов С.С. Новый алгоритм построения кратчайшего пути обхода конечного множества непересекающихся контуров на плоскости / А.А. Полищук, Е.Г. Полищук, С.С. Уколов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2021. – №. 1 (218). – С. 149-165.
4. Петунин, А.А., Ченцов, А.Г., Ченцов, П.А. Оптимальная маршрутизация в задачах последовательного обхода мегаполисов при наличии ограничений / А.А. Петунин, А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов // Челябинский физико-математический журнал. – 2022. – Т. 7. – №. 2. – С. 209-233.
5. Bartoň, M. et al. Geometry and tool motion planning for curvature adapted CNC machining. – 20-21.
6. Jia, Z. et al. A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining / Z. Jia // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2018. – Т. 125. – С. 34-54.
7. Ridwan, F., Xu, X. Advanced CNC system with in-process feed-rate optimisation / F. Ridwan, X. Xu // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2013. – Т. 29. – №. 3. – С. 12-20.
8. Fan, W., Lee, C.H., Chen, J.H. A realtime curvature-smooth interpolation scheme and motion planning for CNC machining of short line segments / W. Fan, C.H. Lee, J.H. Chen // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Т. 96. – С. 27-46.
9. Sousa, V.F.C. et al. Cutting forces assessment in CNC machining processes: a critical review / V.F.C. Sousa // Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 16. – С. 36-45.
10. Hassan, K., Kumar, A., Garg, M.P. Experimental investigation of Material removal rate in CNC turning using Taguchi method / K. Hassan, A. Kumar, M.P. Garg // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2012. – Т. 2. – №. 2. – С. 1581-1590.
11. Chauhan, P., Deep, K., Pant, M. Optimizing CNC turning process using real coded genetic algorithm and differential evolution / P. Chauhan, K. Deep, M. Pant // Transaction on Evolutionary algorithm and Continuous Optimization. – 2011. – Т. 2. – С. 157-165.
12. Xu, X.W., He, Q. Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC / X.W. Xu, Q. He // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2004. – Т. 20. – №. 2. – С. 101-109.
13. Nair, A., Govindan, P., Ganesan, H. A comparison between different optimization techniques for CNC end milling process / A. Nair, P. Govindan, H. Ganesan // Procedia Engineering. – 2014. – Т. 97. – С. 36 – 46.
14. Ramli, K. Application of artificial intelligence methods of tool path optimization in CNC machines: A review / K. Ramli // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – Т. 8. – №. 6. – С. 746-754.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.А. Ушенкин, К.Г.Федотов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kirill.fedotovv@gmail.com

**Аннотация.** В работе рассматриваются современные методы радиолокации с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли и их математические модели. На основе математической модели разработано программное обеспечение формирования тестовых радиоголограмм. При моделировании учитываются такие параметры, как ширина и скорость изменения частоты импульсов, расстояние до объекта и скорость движения космического аппарата. Модельные радиогологramмы используются в качестве исходных данных для алгоритмов синтеза радиолокационных изображений. В работе представлены примеры смоделированных радиоголограмм и синтезированных из них радиолокационных изображений, подтверждающие корректность моделирования.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, радиолокаторы с синтезированной апертурой, моделирование радиолокационных сигналов, радиоголограммы, обработка сигналов.

## FORMATION OF MODEL DATA FOR SPACEBORNE RADAR IMAGE PROCESSING ALGORITHMS' TESTING

V.A. Ushenkin, K.G.Fedotov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, kirill.fedotovv@gmail.com

**Abstract.** The paper examines modern radar methods for Earth remote sensing using synthetic aperture radar (SAR) systems and their mathematical models. The software based on the mathematical model has been developed for generating test SAR raw data. The simulation takes into account the set of parameters such as pulse width and chirp rate, distance to the object, and spacecraft velocity. The modeled SAR raw data serve as input for radar image synthesis algorithms. The paper presents the examples of modeled SAR raw data and the radar images synthesized from them, which are confirming the accuracy of the modeling.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, synthetic aperture radar (SAR), modeling of radar signals, SAR raw data, signal processing.

В настоящее время в современных космических аппаратах, выполняющих дистанционное зондирование Земли, активно применяются радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (PCA) [1]. Результатом работы такой системы является радиоголограмма – комплексный радиосигнал. На рисунке 1 показан пример работы PCA при наблюдении двух точечных объектов. В ходе движения по орбите радиолокационная система периодически отправляет вниз и вбок импульсы с линейно-частотной модуляцией. Между излучениями импульсов устройство фиксирует отраженные эхо-сигналы, которые преобразуются в строки радиоголограммы, представленные как отсчеты комплексных данных. Позиция эхо-сигнала в радиоголограмме определяется наклонной дальностью  $R$  – расстоянием до точки на поверхности Земли, где произошло отражение. Эта дальность  $R$  прямо пропорциональна так называемому быстрому времени  $\tau$  – времени, которое проходит между началом излучения импульса и моментом приема уже отраженного сигнала:  $R = c\tau / 2$ , где  $c$  – скорость света. Также, помимо быстрого времени, существует медленное время  $\eta$  – время, в течение которого антенна PCA подсвечивает земную поверхность. Вместе быстрое и медленное времена образуют единую шкалу времени, которая разделяется в дальнейшем только для удобства. Время приема сигнала  $ij$ -го пикселя радиоголограммы выражается через суперпозицию быстрого и медленного времени:

$$t_{ij} = t(\tau_j, \eta_i) = \eta_i + \tau_j.$$

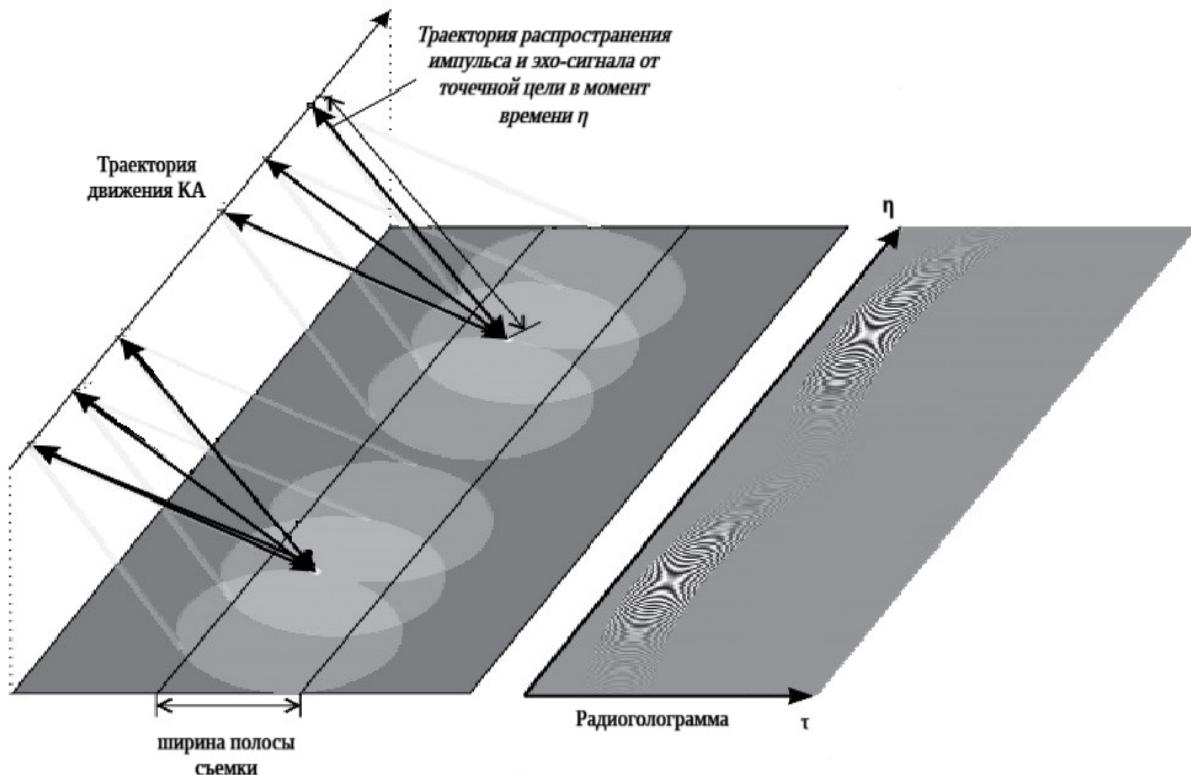


Рис. 1. Геометрия съемки двух точечных объектов и получаемая радиограмма

Учитывая рассмотренную привязку столбцов и строк радиограммы и пренебрегая значениями  $\tau_\eta$ , так как диапазон их возможных значений крайне мал, импульсный отклик РСА можно представить как [1]:

$$s_u(\tau, \eta) = C_u \omega_\tau \left( \tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right) \omega_\eta (\eta - \eta_c) \exp \left( j\pi K_\tau \left( \tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right)^2 \right) \exp \left( -2j\pi f_0 \frac{2R(\eta)}{c} \right), \quad (1)$$

где:

$s_u$  – комплексный сигнал;

$C_u$  – комплексная константа, зависящая от свойств и характеристик РСА и свойств объекта;

$\omega_\tau(\tau) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \tau \leq T \\ 0, & \tau < 0 \text{ или } \tau > T \end{cases}$  – огибающая излученного линейно-частотно модулирован-

ного импульса длительностью  $T$ ;

$\omega_\eta(t)$  – огибающая сигнала в направлении азимута, равная квадрату диаграммы направленности антенны (ДНА);

$\eta_c$  – медленное время, соответствующее времени  $t_c$ , когда максимум ДНА РСА совпадает с направлением на цель;

$K_\tau$  – скорость изменения частоты излученного ЛЧМ-импульса;

$f_0$  – несущая частоты РСА.

Вследствие движения радиолокационной станции по орбите и вращения Земли расстояние до цели непрерывно меняется. Это приводит к тому, что отраженные сигналы, поступающие от одной и той же точки поверхности, занимают разные позиции в строках радиоголограммы. Этот эффект, создающий искажение формы отклика точечной цели, называется миграцией по отсчетам дальности.

Кроме того, относительное перемещение между радиолокатором и объектом вызывает эффект Доплера. В результате этого явления центральная частота принятого сигнала отличается от частоты переданного импульса. Разница между этими частотами называется доплеровской частотой.

Для одной точечной цели изменение частоты сигнала с дальностью имеет линейную зависимость и определяется двумя характеристиками: шириной спектра излучаемого импульса и продолжительностью принятого эхо-сигнала. В направлении азимута изменение частот носит квазилинейный характер. Линейная аппроксимация этого изменения описывается двумя параметрами: средним значением доплеровского сдвига и скоростью изменения частоты сигнала по азимуту

Комплексный сигнал радиоголограммы обладает крайне низким пространственным разрешением. Оно определяется размером отклика от точечной цели.

Понимание законов изменения частотных характеристик сигнала в зависимости от дальности и азимута позволяет значительно повысить детальность локатора. Сжатие импульсного отклика в обоих направлениях обеспечивает получение радиолокационного изображения с существенно более высоким разрешением. Особенно значительное улучшение достигается за счет сжатия по азимуту. Это позволяет добиться такого уровня детализации, который был бы возможен, если бы антenna имела размер, равный расстоянию, пройденному радиолокатором за время наблюдения. Реальные же размеры антеннены обычно составляют всего несколько метров.

На основе выражения (1) можно сформировать модельные радиогологramмы, содержащие отклики от небольшого числа точечных объектов. Число объектов должно быть небольшим из-за высокой вычислительной сложности моделирования. Исходными данными программы являются: частота РСА, высота космического аппарата, линейная скорость. Программа для моделирования разработана на C++. Пример результатов работы программы представлен на рисунке 2. Данный рисунок показывает смоделированные данные в виде действительной части комплексной радиоголограммы, соответствующей сигналу, полученному радиолокатором с синтезированной апертурой от точечной цели. Вдоль горизонтальной оси наблюдается увеличение частоты полос, при удалении от центра отклика, а вдоль вертикальной оси заметно постепенное уменьшение контраста полос.

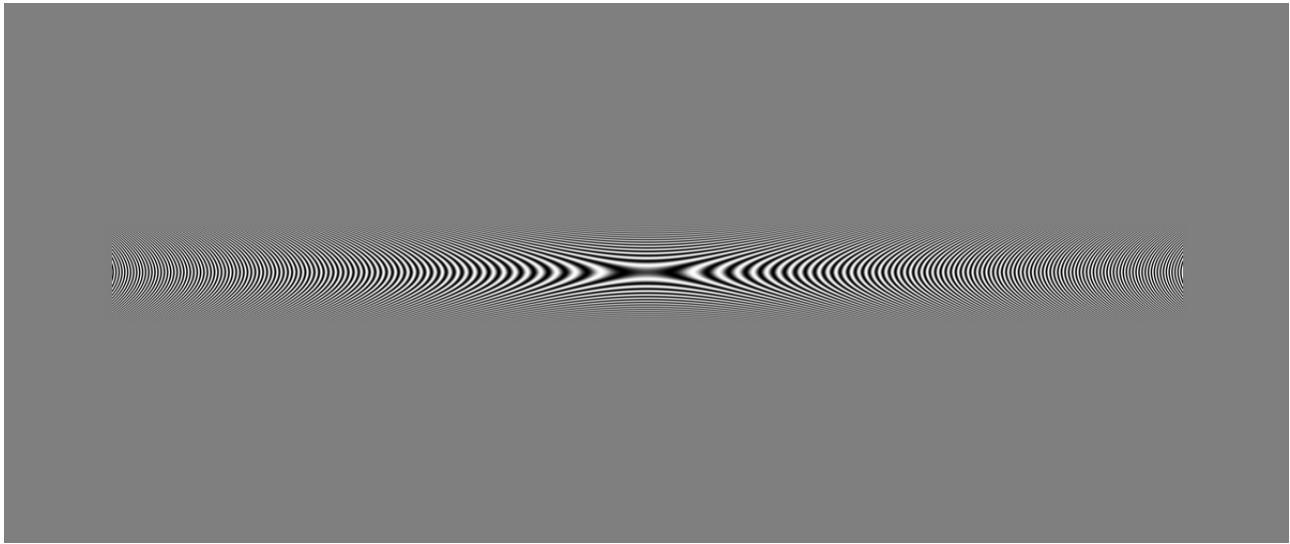


Рис. 2. Пример моделирования радиоголограммы

Для проверки полученных результатов синтезируем радиолокационное изображение из моделированной радиоголограммы. Для этого используем дальностно-допплеровский алгоритм (RDA) [2], включающий следующие этапы.

1. Быстрое преобразование Фурье по дальности.
2. Сжатие по дальности путем умножения сигнала строки в частотной области на фильтр сжатия по дальности и оконную функцию. Частотный фильтр имеет вид:

$$H_\tau(f_\tau) = \frac{1}{T\sqrt{|K_\tau|}} \prod \left( \frac{f_\tau}{K_\tau T} \right) \exp \left( j\pi \frac{f_\tau^2}{K_\tau} \right),$$

где:

$f_\tau$  – значение частоты по дальности;

$\prod(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2 \\ 0, & |x| > 1/2 \end{cases}$  – прямоугольная оконная функция.

3. Обратное быстрое преобразование Фурье по дальности.
4. Быстрое преобразование Фурье по азимуту.
5. Устранение миграции по отсчетам дальности путем сдвига сигнала в каждом пикселе. Каждый пиксель каждой строки имеет уникальную величину сдвига. Сдвиг рассчитывается по формуле:

$$\Delta R(R_\perp, f_\eta) = \frac{\lambda^2 R_\perp f_\eta^2}{8V_{\text{аз}}^2},$$

где:

$\lambda = f_0 / c$  – длина волны РСА;

$R_\perp$  – дальность на траверзе;

$f_\eta$  – доплеровская частота;

$V_{\text{аз}}$  – линейная эквивалентная скорость.

6. Сжатие по азимуту путем умножения сигнала каждого столбца на частотный фильтр сжатия по азимуту и оконную функцию.

$$H_a(f_\eta) = \frac{1}{T_a \sqrt{|K_a|}} \prod \left( \frac{f_\eta}{K_a T_a} \right) \exp \left( j\pi \frac{f_\eta^2}{K_a} \right),$$

где:

$K_a$  – доплеровская скорость;

$T_a = f_{imp} / K_a$  – время синтеза апертуры.

7. Обратное преобразование Фурье по азимуту.

Результат обработки рассмотренным алгоритмом радиоголограммы, представленной на рисунке 2, приведен на рисунке 3. Из рисунка видно, что при фокусировке радиоголограммы амплитуда импульсного отклика представлена в виде «креста» с максимальной амплитудой в центре, что соответствует двухмерной sinc-функции.

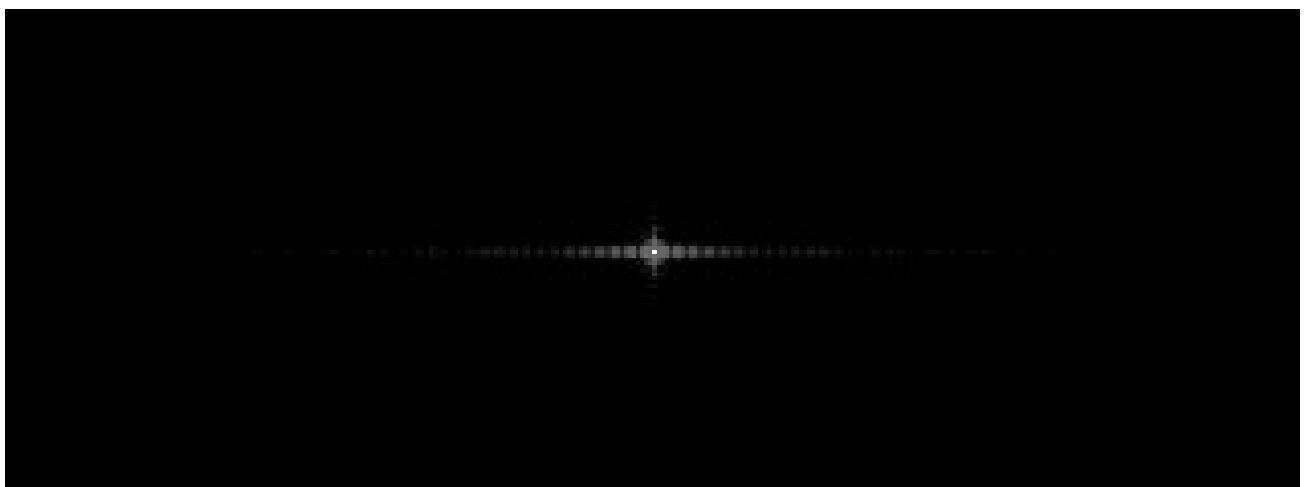


Рис. 3. Радиолокационное изображение одиночной точечной цели

Таким образом, полученные модельные данные действительно соответствуют импульсному отклику РСА от одиночной точечной цели. Эти данные представляют собой основу для отработки и тестирования алгоритмов обработки радиолокационных изображений.

### Библиографический список

1. Цифровая обработка данных радиолокационного зондирования Земли из космоса: учебное пособие / Под ред. В. В. Еремеева, В.А. Ушенкина. - Москва, 2021. - 256с.

2. Cumming I.G., Wong F.H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation. Artech House, 2005. 660p.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НА МУЛЬТИПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В.А. Ушенин, Е.А. Соколов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, foton@rsreu.ru*

**Аннотация.** В работе проанализированы основные принципы поляриметрической обработки радиолокационных изображений, алгоритмы получения декомпозиций Паули и  $H / A / \bar{\alpha}$  для последующей сегментации объектов на мультиполаризационных изображениях. Рассматриваются различные варианты сегментации: на основе пороговой обработки результатов декомпозиции и с применением метода K-средних и меры сходства Уишарта.

**Ключевые слова:** радиолокационные изображения, поляриметрическая декомпозиция, декомпозиция  $H / A / \bar{\alpha}$ , сегментация объектов, метод K-средних, классификатор Уишарта.

## SEGMENTATION OF OBJECTS ON MULTIPOLARIZATION RADAR IMAGES

V.A. Ushenkin, E.A. Sokolov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, foton@rsreu.ru*

**Abstract.** The paper analyzes the fundamental principles of radar image polarimetric processing and the algorithms for obtaining Pauli and  $H / A / \bar{\alpha}$  decompositions with the aim of subsequent object segmentation in multipolarization images. Various segmentation approaches are considered, including thresholding based on decomposition results, as well as the application of the K-means method and the Wishart similarity measure.

**Keywords:** radar images, polarimetric decomposition,  $H / A / \bar{\alpha}$  decomposition, object segmentation, K-means method, Wishart classifier.

Сегментация объектов на мультиполаризационных радиолокационных изображениях — это процесс выявления областей с различными типами объектов (например, зданий, растительности, воды) с учетом информации о поляризации радиолокационного сигнала. Данная задача актуальна для нужд картографирования, сельского хозяйства, военного дела, судоходства, мониторинга окружающей среды и других областей.

Поскольку существует ряд ограничений, возникающих при съемке спутником поверхности планеты в видимом спектре электромагнитного излучения (облачность и другие атмосферные явления, недостаточная освещенность), для дистанционного зондирования Земли часто используют активные локаторы, излучающие электромагнитные волны в радиочастотном диапазоне, для которого атмосфера практически прозрачна. Полученная после принятия отраженного сигнала радиоголограмма непригодна для использования человеком без предварительной обработки, при которой требуется синтезировать из радиоголограммы изображение, корректно распознать и выделить на нем объекты, сопоставив каждому из их типов определенный цвет на индексном изображении или маску выделения. Полученная со спутника информация содержит шум, что может исказить результаты сегментации объектов. Данные ограничения нужно учитывать при выборе методов сегментации.

### Теоретическая часть

Радиолокационные данные, передаваемые спутниками, включают разные поляризационные каналы с информацией о физических и геометрических свойствах поверхности. Располагая четырьмя синхронно полученными радиоголограммами с поляризациями HH, HV, VH и VV, где H – это горизонтальная поляризация, V – вертикальная; первая буква соответствует поляризации сигнала при излучении, вторая – при приеме, можно провести декомпозицию полученных данных в виде комбинации сигналов от элементарных отражателей (ди-

полей, спиралей, уголковых и т.п.) и затем сегментировать объекты на изображениях при помощи различных методов.

Исходные радиолокационные изображения, являющиеся результатом первичной обработки радиоголограмм, содержат комплексный сигнал  $S(R_{\perp}, \eta_{\perp})$  и представлены в так называемой антенной геометрии «наклонная дальность на траперзее  $R_{\perp}$  – азимутальное время максимального сближения  $\eta_{\perp}$ » [1].

Каждый из пикселей полученного набора изображений с поляризациями HH, HV, VH, VV характеризуется поляризационной матрицей рассеяния (ПМР):

$$S(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = \begin{pmatrix} S_{HH}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) & S_{HV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \\ S_{VH}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) & S_{VV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $S_{HV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \approx S_{VH}(R_{\perp}, \eta_{\perp})$ .

Помимо ПМР, пиксель можно охарактеризовать поляриметрическими матрицами ковариации (ПМКв) и когерентности (ПМКг). В отличие от ПМР данные матрицы, позволяют описать не точечные, а площадные объекты с уменьшением количества помех в виде спектрального шума, возникающего из-за интерференции между когерентными волнами, рассеянными множеством близкорасположенных мелких объектов.

ПМКв получается из ПМР при ее векторизации, при этом считается, что  $S_{HV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = S_{VH}(R_{\perp}, \eta_{\perp})$ :

$$s(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = \begin{pmatrix} S_{HH}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) & \sqrt{2} \cdot S_{HV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) & S_{VV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \end{pmatrix}^T. \quad (2)$$

Отсюда можно вычислить ПМКв:

$$C(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = E\{s \cdot (s^*)^T\} = \begin{pmatrix} E\{|S_{HH}|^2\} & E\{\sqrt{2} \cdot S_{HH} S_{HV}^*\} & E\{S_{HH} S_{VV}^*\} \\ E\{\sqrt{2} \cdot S_{HV} S_{HH}^*\} & E\{2 |S_{HV}|^2\} & E\{\sqrt{2} \cdot S_{HV} S_{VV}^*\} \\ E\{S_{VV} S_{HH}^*\} & E\{\sqrt{2} \cdot S_{VV} S_{HV}^*\} & E\{|S_{VV}|^2\} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $s^*$  – операция комплексного сопряжения, а  $E\{S\}$  – усреднения по соседним пикселям в прямоугольном окне.

Одной из простых и наиболее распространенных декомпозиций является декомпозиция Паули, описываемая уравнением:

$$\sqrt{2} \cdot S(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = \alpha_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \beta_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + \gamma_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Коэффициенты декомпозиции можно рассчитать по формулам:

$$\alpha_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = \frac{S_{HH}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) + S_{VV}(R_{\perp}, \eta_{\perp})}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$\beta_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = \frac{S_{HH}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) - S_{VV}(R_{\perp}, \eta_{\perp})}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

$$\gamma_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = \frac{S_{HV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) + S_{VH}(R_{\perp}, \eta_{\perp})}{\sqrt{2}} \approx \sqrt{2} \cdot S_{HV}(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \quad (7)$$

Обычно на результирующем изображении с  $|\alpha_p|^2$  сопоставляется синий цвет (гладкая поверхность),  $|\beta_p|^2$  – красный (уголковый отражатель),  $|\gamma_p|^2$  соответствует зеленому (объемное рассеяние) [2].

На основе декомпозиции Паули может быть получена ПМКг:

$$T(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = E\{P \cdot (P^*)^T\} = \begin{pmatrix} E\{|\alpha_p|^2\} & E\{\alpha_p \cdot \beta_p^*\} & E\{\alpha_p \cdot \gamma_p^*\} \\ E\{\beta_p \cdot \alpha_p^*\} & E\{|\beta_p|^2\} & E\{\beta_p \cdot \gamma_p^*\} \\ E\{\gamma_p \cdot \alpha_p^*\} & E\{\gamma_p \cdot \beta_p^*\} & E\{|\gamma_p|^2\} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $P$  – вектор, содержащий коэффициенты (5) – (7):

$$P(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = (\alpha_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \quad \beta_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}) \quad \gamma_p(R_{\perp}, \eta_{\perp}))^T. \quad (9)$$

Для ПМКг может быть выполнена декомпозиция  $H / A / \bar{\alpha}$ . При ее расчете для каждого пикселя изображения необходимо получить отсортированные по убыванию три собственных числа  $\lambda_i$  матрицы (8) и соответствующие им собственные векторы  $u_i$ , рассчитать энтропию  $H$ , анизотропию  $A$ , средний угол рассеяния  $\bar{\alpha}$ :

$$H = -\sum_{i=1}^3 P_i \cdot \log_3 P_i, \quad (10)$$

$$A = \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \right), \quad (11)$$

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot \alpha_i, \quad (12)$$

где  $P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$ , а каждое из значений  $\alpha_i$  вычисляется как арккосинус модуля первого элемента соответствующего вектора  $u_i$ . Далее полученным значениям параметров (10) – (12) сопоставляется либо отдельное изображение, либо цветовой канал в результирующем изображении, при этом стоит учесть, что значения энтропии и анизотропии лежат в интервале от нуля до единицы, а среднего угла рассеяния – от 0 до 90 градусов.

После выполнения декомпозиции можно перейти непосредственно к сегментации объектов на изображении. Клод и Потье в работе [3] предложили разделение плоскости  $H / \bar{\alpha}$  на 9 зон, каждой из которых соответствуют определенные поляриметрические сегменты:

1.  $H \in [0, 9; 1]$ ,  $\bar{\alpha} \in [55^\circ; 90^\circ]$ ,
2.  $H \in [0, 9; 1]$ ,  $\bar{\alpha} \in [40^\circ; 55^\circ]$ ,
3.  $H \in [0, 9; 1]$ ,  $\bar{\alpha} \in [0^\circ; 40^\circ]$ , недостижима,
4.  $H \in [0, 5; 0, 9]$ ,  $\bar{\alpha} \in [50^\circ; 90^\circ]$ ,
5.  $H \in [0, 5; 0, 9]$ ,  $\bar{\alpha} \in [40^\circ; 50^\circ]$ ,
6.  $H \in [0, 5; 0, 9]$ ,  $\bar{\alpha} \in [0^\circ; 40^\circ]$ ,
7.  $H \in [0; 0, 5]$ ,  $\bar{\alpha} \in [47, 5^\circ; 90^\circ]$ ,
8.  $H \in [0; 0, 5]$ ,  $\bar{\alpha} \in [42.5^\circ; 47.5^\circ]$ ,
9.  $H \in [0; 0, 5]$ ,  $\bar{\alpha} \in [0^\circ; 42.5^\circ]$ .

Недостаток подобного условного разделения заключается в большой вероятности попадания разных физических объектов в одинаковые зоны, поэтому желательно либо учитывать дополнительные признаки, например, анизотропию  $A$ , и благодаря этому получить большее количество зон, либо уточнить результаты сегментации.

Сегментация каждого из пикселей заключается в определении ближайшей эталонной поляриметрической матрицы ковариации или когерентности для данного пикселя при помощи меры сходства: обычно используются многомерное комплексное распределение Гаусса либо Уишарта. Если для первого требуется ПМКв пикселей, то для второго при расчетах можно использовать помимо ее также и ПМКг, в любом из случаев получая идентичные результаты сегментации [2].

Основные шаги алгоритма неконтролируемой поляриметрической сегментации объектов, предложенного Клодом и Потье в [3] на основе метода К-средних:

1) выделяется 8 зон в плоскости  $H / \bar{\alpha}$  (зона 3 из варианта разбиения Клода–Потье игнорируется), либо 16 зон в модифицированном варианте с учетом дополнительного разбиения каждой допустимой зоны на две подзоны с анизотропией  $A \geq 0,5$  и  $A < 0,5$ ;

2) для каждого сегмента вычисляется средняя ПМКг  $T_{\text{эм},i}$  принадлежащих ему пикселей;

3) каждому из пикселей назначается ближайший сегмент  $T_{\text{эм},i}$  в соответствии с мерой сходства по Уишарту:

$$d_w(T, i) = \ln |T_{\text{эм},i}| + \text{tr}(T_{\text{эм},i}^{-1} \cdot T). \quad (13)$$

Шаги 2 – 3 выполняются до тех пор, пока на новой итерации алгоритма число пикселей, сменивших сегмент, не станет меньше заданного порогового значения.

### Практическая часть

Декомпозиция  $H / A / \bar{\alpha}$  и сегментация Клода – Потье для 8 и 16 зон при окне усреднения 7x7 пикселей представлены на рисунке 1 (а), 1 (б), 1 (в).

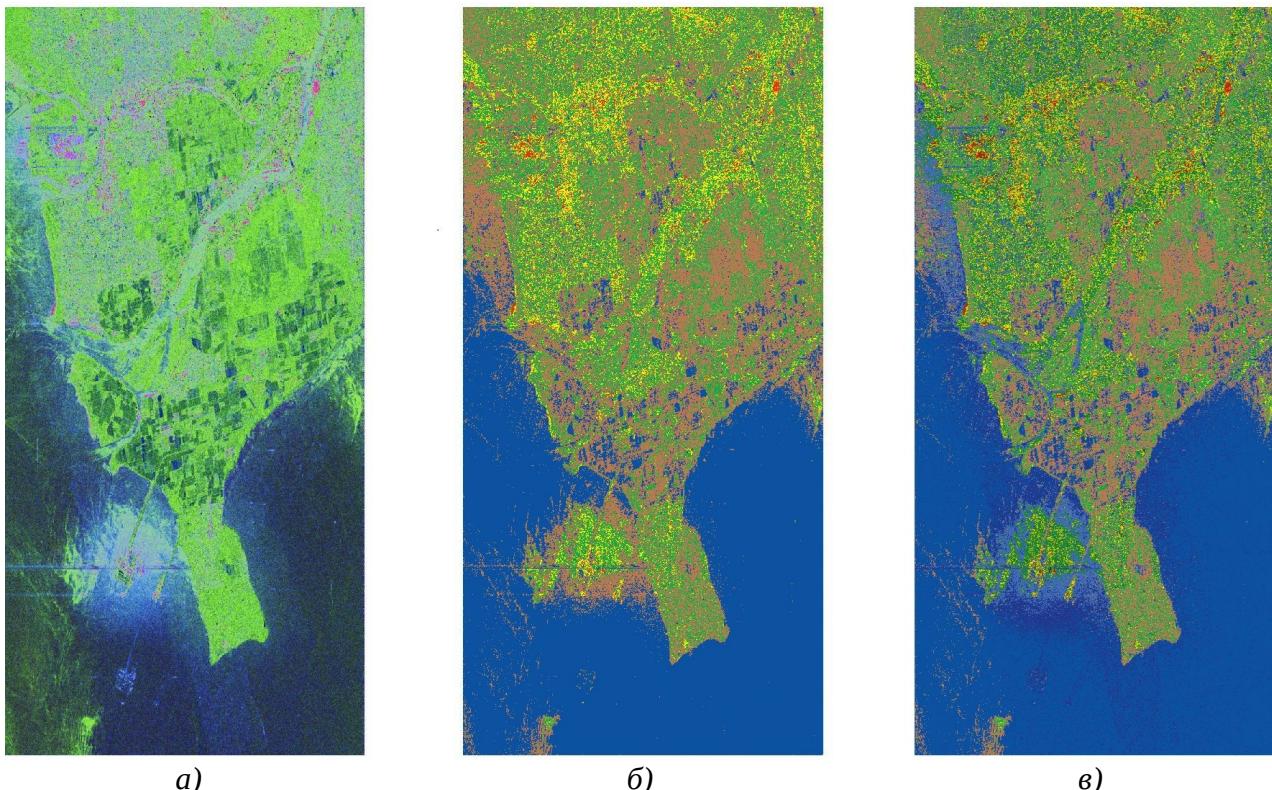


Рис. 1. Декомпозиция  $H / A / \bar{\alpha}$  (а) и сегментация Клода – Потье для 8 (б) и 16 (в) зон при окне 7x7 пикселей

Как видно из рисунков 1 (б, в), значительное число объектов оказалось в несвойственных им сегментах: например, часть суши отображается как вода и наоборот, причем использование 16 сегментов вместо 8 несколько сгладило проблему, но не устранило ее.

Для улучшения результата было проведено уточнение по методу К-средних с использованием меры сходства по Уишарту до тех пор, пока количество пикселей, у которых изменился сегмент, не стало меньше 1% от общего их количества на изображении. Результат проведения сегментации представлен на рисунках 2 (а, б) для 8 и 16 сегментов соответственно.

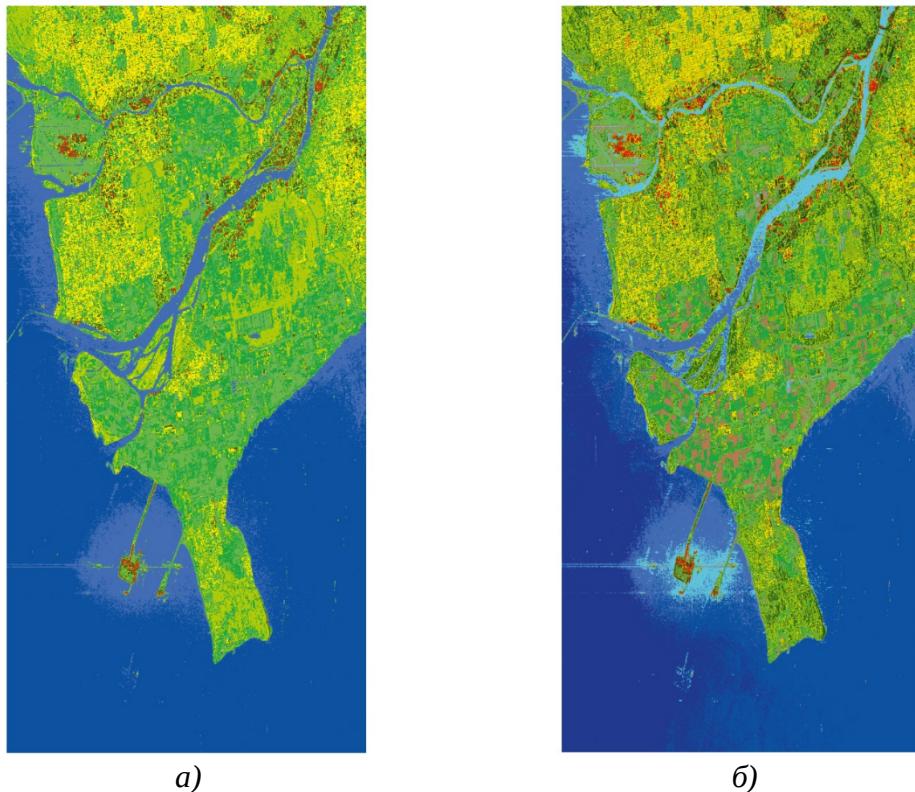


Рис. 2. Сегментация Клода – Потье – Уишарта для 8 (а) и 16 (б) зон по результатам декомпозиции  $H / A / \bar{\alpha}$

Как видно из рисунков 2 (а, б), качество сегментации объектов значительно возросло, причем на рисунке 2 (б) особенно заметно разделение воды на речную, морскую и другие подтипы. Однако на обоих изображениях осталось незначительное количество мест с некорректной с точки зрения физического смысла сегментацией: их появление было вызвано смещением центров сегментов в ходе метода К-средних, что требует дополнительной обработки полученных изображений.

Таким образом, наилучшие результаты сегментации обеспечивает применение метода К-средних с мерой сходства по Уишарту. При этом актуальны дальнейшие исследования по улучшению качества сегментации объектов на мультиполяризационных радиолокационных изображениях.

### Библиографический список

1. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли //М: ФИЗМАТЛИТ. – 2019.
2. Цифровая обработка данных радиолокационного зондирования земли из космоса : учебное пособие / С.И. Гусев, Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев [и др.]; под. ред. В.В. Еремеева, В.А. Ушенкина. — Москва: КУРС, 2021. — 248 с. + 24 вклейки.
3. Lee J. S. et al. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and complex Wishart classifier //IGARSS'98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings.(Cat. No. 98CH36174). – IEEE, 1998. – Т. 4. – С. 2178-2180.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

## ЭФФЕКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РАСЧЁТОВ НА ВИДЕОУСКОРИТЕЛЕ В ЗАДАЧЕ СЕГМЕНТАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ НА ОПТИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В.А. Ушенкин, С.А. Ларюков, В.А. Овчинников

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, foton@rsreu.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается задача нейросетевой сегментации облачности на изображениях, сформированных космическими аппаратами оптико-электронного наблюдения Земли. Для обеспечения высокой скорости сегментации принимаются следующие меры. Во-первых, выполняется оптимизация классической нейросетевой архитектуры «U-Net». Во-вторых, разрабатывается библиотека выполнения свёрточных нейронных сетей (СНС) на видеоускорителе. В работе описываются модифицированная архитектура «Lanky U-Net», формат внутреннего хранения нейросетевой модели в виде вычислительного графа, порядок организации вычислений в графе. Осуществлено распараллеливание вычислений на графическом процессоре. Приводятся экспериментальные исследования точности и скорости сегментации облачности на спутниковых изображениях.

**Ключевые слова:** свёрточные нейронные сети, обработка изображений, дистанционное зондирование Земли, сегментация облачности.

## EFFICIENT NEURAL NETWORK GPU CALCULATIONS IN THE TASK OF CLOUD SEGMENTATION IN OPTICAL SATELLITE IMAGES

V.A. Ushenkin, S.A. Laryukov, V.A. Ovchinnikov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, foton@rsreu.ru

*The summary.* The paper considers the problem of neural network segmentation of clouds in images generated by optical-electronic Earth observation satellites. To achieve high segmentation speed, the following measures are taken. First, the classic «U-Net» neural network architecture is optimized. Second, a library for executing convolutional neural networks (CNN) on GPU is developed. The paper describes the modified «Lanky U-Net» architecture, the format for internal storage of the neural network model as a computational graph, and the organization of computations within the graph. Parallelization of calculations on the GPU has been implemented. Experimental studies of the accuracy and speed of cloud segmentation in satellite images are presented.

**Keywords:** convolutional neural networks, image processing, remote sensing of the Earth, cloud segmentation.

При обработке данных дистанционного зондирования Земли видимого и ближнего инфракрасного диапазонов облачность часто является негативным фактором, ограничивающим полезную составляющую изображения [1]. Сплошная облачность полностью скрывает объекты земной поверхности, а дымка искажает яркостные характеристики наблюдаемых объектов. Даже в радиолокации, обычно всепогодной, облачность оказывает негативное влияние при дифференциальной интерферометрической обработке. Радиолокационный сигнал проходит сквозь облачность, но при этом возникает задержка, которая ошибочно воспринимается как смещение наблюдаемого объекта.

Ручное определение границ облачности является достаточно трудоёмким, а детерминированные алгоритмы для этой задачи малопригодны. Для автоматизации сегментации облачности может успешно применяться аппарат искусственного интеллекта [2].

В случае радиолокации облака на радиояркости не заметны и проявляются только в фазе комплексного сигнала. Но при наличии синхронной оптической и радиолокационной съемки облачность может быть выделена по оптическому снимку, а результаты сегментации могут быть применены для отбраковки искаженных участков радиолокационной интерферограммы.

## Оптимизация архитектуры нейронной сети

Для увеличения производительности нейросетевой обработки оптических изображений предложена нейросетевая архитектура, полученная на основе оптимизации архитектуры «U-Net» [3], наиболее распространённой в задачах бинарной сегментации изображений. Разработанная искусственная нейронная сеть (ИНС) «Lanky U-Net» (рисунок 1) характеризуется меньшим объемом вычислений с сохранением качества сегментации облачности.

В оптимизированной архитектуре более чем в 8 раз сокращено число весовых коэффициентов. Вдвое сокращено число каналов в тензорах промежуточных слоёв ИНС, что позволило существенно увеличить максимальный размер минипакета при параллельной обработке на видеоускорителе. Число элементарных вычислительных операций на анализируемый фрагмент также сокращено более чем в 21 раз. Сравнительная характеристика приводится в таблице 1.

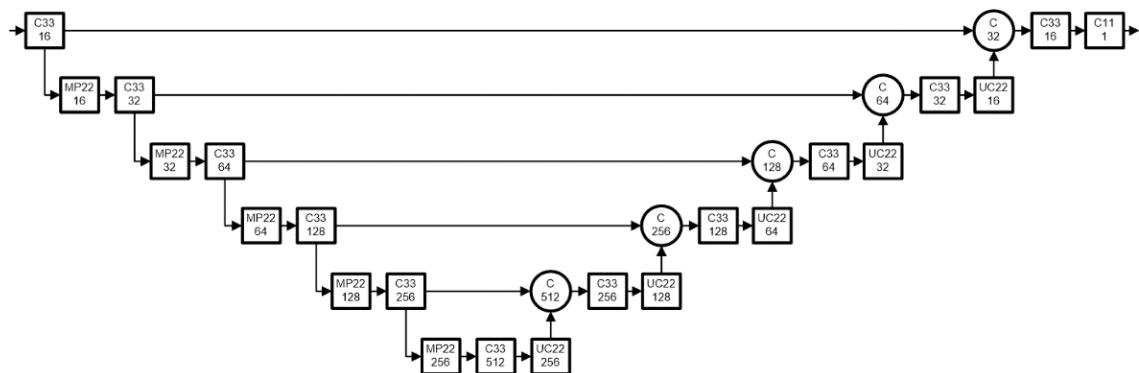


Рис. 1. Архитектура модели «Lanky U-Net»

Таблица 1. Сравнительная характеристика ИНС «U-Net» и оптимизированной ИНС «Lanky U-Net».

Параметры архитектуры	«U-Net»	«Lanky U-Net»
Анализируемая окрестность пикселя	~200x200	~200x200
Число весовых коэффициентов	~32 млн	~3,8 млн
Число элементарных сложений и умножений	218 млрд	10 млрд
Максимальный размер минипакета при 12 Гб видеопамяти (фрагмент 512x512)	3	13
Максимальное число каналов в промежуточных слоях	1024	512
Доля ошибок сегментации на валидационной выборке	~0,06	~0,02

В выходном слое нейронной сети формируется бинарная растровая маска, отражающая наличие или отсутствие элементов облачности на каждом пикселе изображения (рисунок 2).

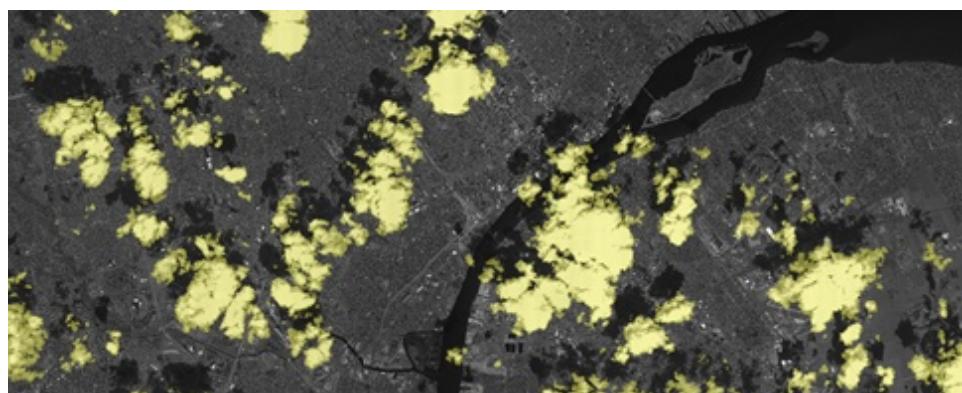


Рис. 2. Результат сегментации облачности на панхроматическом изображении

## Разработка библиотеки эффективного выполнения нейросетевых расчетов

Для выполнения модели ИНС разработан внутренний формат файла .nn. Его структура приведена на рисунке 3. В файле последовательно хранится информация о версии библиотеки и конвертера, число слоёв НС и информация о нейросетевых слоях, включающая выходные размеры тензоров, параметры и веса слоёв (при наличии).

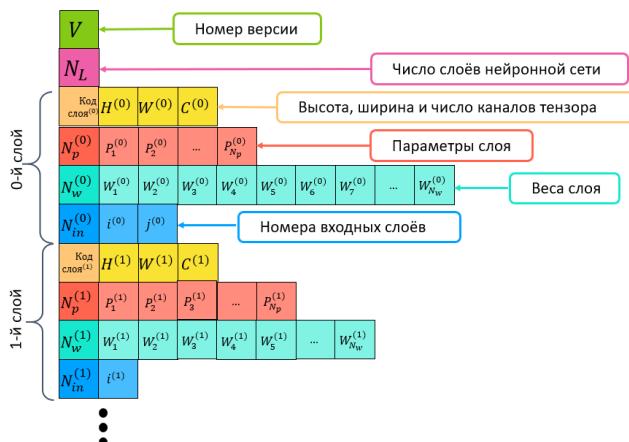


Рис. 3. Структура разработанного формата хранения модели нейронной сети

Модель НС представлена в библиотеке в виде ориентированного ациклического графа, узлами которого являются нейросетевые слои. Направление связей – обратное, от выходного слоя ко входному. Операции выполняются при помощи рекурсивного спуска. Подобная конфигурация позволяет опрашивать отдельные фрагменты нейросети, без необходимости расчёта всего графа целиком, что может быть особенно полезно при отладке модели.

Сценарий использования библиотеки представлен на рисунке 4.

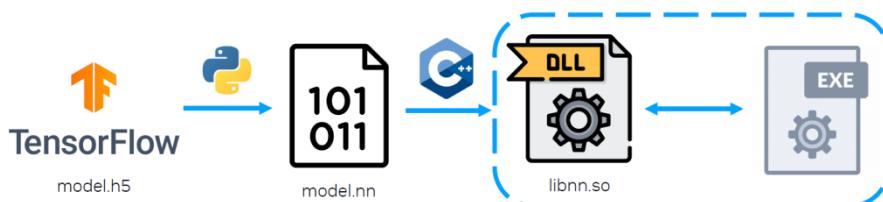


Рис. 4. Сценарий использования разрабатываемой библиотеки

Модель, предварительно обученная с помощью платформы Tensorflow, в формате .h5 или .hdf5 поступает на вход Python-конвертера. Проводится оптимизация, указывается порядок измерений в тензорах, и модель конвертируется во внутренний формат .nn. Полученная модель может быть открыта и выполнена разработанной библиотекой. Сама же библиотека динамически связывается с приложением, которое будет её использовать.

Библиотека является кроссплатформенной в плане компиляции (компилируется gcc в части вычислений на центральном процессоре и nvcc в части вычислений на видеокарте).

На этапе конвертера производится оптимизация нейронной сети. Например, операция пакетной нормализации  $B(X)$  над тензором  $X$  в режиме выполнения может быть сведена к линейной функции [4]:

$$B(X) = \gamma \frac{X - E[X]}{\sqrt{D[X] + \varepsilon}} + \beta = \left| k = \frac{\gamma}{\sqrt{D[X] + \varepsilon}}, b = \beta - \frac{\gamma E[X]}{\sqrt{D[X] + \varepsilon}} \right| = kX + b,$$

где  $E[X]$  и  $D[X]$  – скользящие среднее и дисперсия, известные на момент выполнения,  $\beta, \gamma, \varepsilon = const$ ; а последовательность операций пространственной свёртки  $C(X) = W * X + c$ , где  $W$  – тензор весов и  $c$  – вектор свободных членов, и пакетной нормализации  $B(X)$  может быть объединена в операцию свёртки с модифицированными весами:

$$B(C(X)) = B(W * X + c) = k(W * X + c) + b = (kW) * X + b + c = W^* * X + c^*$$

Разработанная библиотека в качестве зависимостей использует только CUDA и cuDNN – компоненты, необходимые для осуществления параллельных вычислений на графическом процессоре. Предусмотрена адаптивная компиляция: библиотека подстраивается под установленные на целевом устройстве версии CUDA и cuDNN, а также может компилироваться без них и работать на центральном процессоре. При этом вычисления на процессоре распараллелены на потоки, для критически важных операций проведена векторизация с использованием процессорных инструкций AVX и SSE.

Перечень поддерживаемых библиотекой операций представлен в таблице 2.

Таблица 2. Матрица поддержки нейросетевых слоёв

Название операции	CPU	CUDA	cuDNN	Примечание
Add	+	+	+	В том числе cuDNN Graph API
Average pooling 2d	+		+	
Batch normalization	+		+	AVX, SSE
Concatenate	+	+		
Convolution 2d	+		+	AVX, SSE
Convolution 2d transpose	+	+		
Fully connected	+	+		
Global average pooling 2d	+	+		
Max pooling 2d	+		+	
Relu	+	+	+	AVX, SSE
Resizing	+	+		AVX, SSE
Softmax	+	+	+	AVX, SSE, cuDNN для основных параметров
Zero padding 2d	+	+		

### Экспериментальные исследования

Для определения эффективности упрощенной нейросетевой модели «Lanky U-Net» проводилось ее сравнение с моделью «Cloud-Net+», предложенной для сегментации облачности в [5]. Для «Lanky U-Net» ошибка сегментации первого рода составила 2,2 %, ошибка второго рода – 9,2 %. Для «Cloud-Net+», несмотря на большую сложность нейросетевой архитектуры, ошибки сегментации оказались выше: 12,7 % ошибка первого рода и 11,1 % ошибка второго рода.

Для определения скорости обработки с помощью разработанной библиотеки проводилось тестирование её работы на панхроматических снимках космического аппарата «Ресурс-П». Сегментация облачности осуществлялась с помощью упрощенной нейросетевой модели «Lanky U-Net». Сравнение выполнялось с библиотекой TensorFlow 1.14 на видеокарте Nvidia GeForce GTX 1080 в Astra Linux. Экспериментальные результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Оценки производительности и качества работы библиотеки на модели «Lanky U-Net»

Тестируемое изображение		Производительность, МП/с		Ускорение, %	Точность, %
Название	Размер, МП	TensorFlow	Разработанная библиотека		
Иркутск	74.92	2.08	3.47	67.0	99.9990
Карелия	143.48	2.08	3.44	65.4	<b>99.9997</b>
Карлстад, Швеция	51.83	2.07	3.46	<b>67.8</b>	99.9959
Кейптаун, ЮАР	74.80	2.06	3.39	64.4	99.9981
Краснодар	145.97	<b>2.15</b>	<b>3.52</b>	63.7	<b>99.9997</b>
Минеральные Воды	<b>207.88</b>	2.13	3.46	62.4	99.9995

Таким образом, разработана нейросетевая архитектура «Lanky U-Net», обеспечивающая большую точность сегментации, чем более сложные нейронные сети [5], при меньшем объеме вычислений. Скорость сегментации дополнительно увеличена за счет разработки программного модуля выполнения нейросетевых расчетов на видеоускорителе. Библиотека кроссплатформенна, адаптивна и обладает минимумом внешних зависимостей. Достигнуто увеличение скорости нейросетевой обработки аэрокосмических изображений в среднем на 65 % по сравнению с библиотекой TensorFlow.

### Библиографический список

1. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А., Ларюков С.А. Алгоритм и программный комплекс высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на панхроматических изображениях от космических аппаратов «Ресурс П» // Цифровая обработка сигналов. 2023. №3. С. 8–17.
2. Morales G., Ramírez A., Telles J. End-to-end cloud segmentation in high-resolution multispectral satellite imagery using deep learning //2019 IEEE XXVI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON). – IEEE, 2019. – С. 1-4.
3. Ronneberger O., Fischer P. and Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2015. P. 234–241.
4. Ioffe, S., Szegedy, C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. ArXiv, abs/1502.03167 - 2015.
5. Mohajerani S., Saeedi P. Cloud and Cloud Shadow Segmentation for Remote Sensing Imagery via Filtered Jaccard Loss Function and Parametric Augmentation // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2021. Vol. 14. P. 4254–4266.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## УТОЧНЕНИЕ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.А. Ушенкин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, foton@rsreu.ru

**Аннотация.** В работе предлагаются два метода уточнения угловой ориентации радиолокационного космического аппарата дистанционного зондирования Земли на основе анализа целевой информации. Первый метод предназначен для уточнения углов рысканья и тангажа по значениям доплеровского центроида, оценивание которых выполнено путем амплитудного анализа радиолокационных изображений, синтезированных из радиоголографм по субапертурам. Второй метод предназначен для уточнения угла крена по положению максимума угломестной диаграммы направленности антенны, оцененному путем статистического амплитудно-дифференциального анализа радиолокационного изображения при его радиометрической коррекции. Приводятся результаты экспериментальной оценки эффективности предлагаемых методов.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, радиоголограмма, первичная обработка, радиометрическая коррекция, угловая ориентация, космический аппарат.

## SAR REMOTE SENSING SATELLITE ATTITUDE ESTIMATION BASED ON IMAGERY AMPLITUDE ANALYSIS

V.A. Ushenkin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, foton@rsreu.ru*

**Abstract.** The paper proposes two methods for SAR remote sensing satellite attitude based on imagery amplitude analysis. The first method is intended to refine the yaw and pitch angles using the Doppler centroid values obtained by amplitude analysis of two radar images synthesized from raw data in subapertures. The second method is intended to refine the roll angle using the position of the antenna elevation pattern maximum obtained by statistical amplitude-differential analysis of the radar image during its radiometric correction. The results of experimental study of proposed methods' efficiency are presented.

**Keywords:** radar image, SAR raw data, primary processing, radiometric correction, attitude, satellite.

Знание угловой ориентации космического аппарата радиолокационного наблюдения Земли необходимо для качественного выполнения первичной обработки целевой информации, заключающейся в синтезе радиолокационного изображения из радиоголограммы и последующей радиометрической коррекции синтезированного изображения. Угловая ориентация космического аппарата обычно измеряется с помощью блоков определения координат звезд (БОКЗ) и датчиков угловых скоростей. В ходе эксплуатации космического аппарата могут происходить нештатные ситуации, при которых точность измерения угловой ориентации снижается. В этом случае для сохранения высоких характеристик формируемых информационных продуктов необходимо уточнение измерений на основе анализа обрабатываемых данных.

### Уточнение углов рысканья и тангажа

Углы рысканья и тангажа космического аппарата определяют значение одного из основных параметров синтеза изображения из радиоголограммы – доплеровского центроида  $f_{\text{дц}}$ , который обычно представляется в виде комбинации двух составляющих: относительного значения и доплеровской неопределенности:

$$f_{\text{дц}} = f_{\text{дц отн}} + M_{\text{дц}} f_{\text{имп}},$$

где  $f_{\text{дц отн}} \in [-f_{\text{имп}} / 2, f_{\text{имп}} / 2]$  – относительное значение;

$f_{\text{имп}}$  – частота повторения зондирующих импульсов;

$M_{\text{дц}} \in Z$  – доплеровская неопределенность;

$Z$  – множество целых чисел.

Относительное значение доплеровского центроида и доплеровская неопределенность обычно оцениваются отдельно с помощью различных алгоритмов [1–7]. В настоящей работе предлагается метод совместной оценки этих параметров.

Каждая оценка выполняется по отдельному фрагменту, общему для двух комплексных изображений, синтезированных из радиоголограммы по субапертурям.

Для оценки относительного значения комплексные сигналы двух изображений суммируются, а фрагмент делится на смежные фрагменты меньшего размера. В пределах каждого  $k$ -го малого фрагмента на основе быстрого преобразования Фурье вычисляется амплитудный спектр  $A_k(f)$  суммы всех столбцов фрагмента. Оценка относительного значения доплеровского центроида вычисляется как

$$f_{\text{дц отн}} = \frac{f_{\text{имп}}}{2\pi} \arg \sum_i \exp \left( j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{имп}}} \right) \sum_k A_k(f_i),$$

где  $j$  – мнимая единица.

Для последующей оценки доплеровской неопределенности вычисляется ошибка относительного значения как

$$\Delta f_{\text{дц отн}} = (f_{\text{дц отн}} - \tilde{f}_{\text{дц отн}}) \bmod f_{\text{имп}},$$

где  $\Delta f_{\text{дц отн}} \in [-f_{\text{имп}}/2, f_{\text{имп}}/2]$ ,  $\tilde{f}_{\text{дц отн}}$  – значение, использованное при синтезе изображений.

Если  $-0,25f_{\text{имп}} < \Delta f_{\text{дц отн}} < 0,25f_{\text{имп}}$ , выполняется корреляционно-экстремальное совмещение амплитуд изображений в пределах одного и того же фрагмента, а поправка к доплеровской неопределенности вычисляется по найденному горизонтальному рассогласованию изображений  $\Delta x$  как:

$$\Delta M_{\text{дц}} = \left[ \frac{2f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta x}{(K_1 + K_2) f_{\text{имп}}^2 c R_{\perp} f_{\text{дискр}}} \right],$$

где  $R_{\perp}$  – дальность на траверзе;

$f_0$  – рабочая частота радиолокатора;  $c$  – скорость света в вакууме;

$V_{\text{лз}}$  – линейная эквивалентная скорость;

$f_{\text{дискр}}$  – частота дискретизации.

Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  вычисляются в зависимости от знака  $\Delta f_{\text{дц отн}}$ .

Если  $\Delta f_{\text{дц отн}} < 0$ :

$$K_1 = -\frac{\int_{-f_{\text{имп}}/2-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{-\Delta f_{\text{дц отн}}} f W(f) df}{\int_{-f_{\text{имп}}/2-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}} W(f) df}, \quad K_2 = \frac{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2} f W(f) df}{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2} W(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}},$$

где  $W(f)$  – амплитудный спектр квадрата азимутальной диаграммы направленности (ДНА) антенны радиолокатора.

Если  $\Delta f_{\text{дц отн}} \geq 0$ :

$$K_1 = -\frac{\int_{-f_{\text{имп}}/2}^{-\Delta f_{\text{дц отн}}} f W(f) df}{\int_{-f_{\text{имп}}/2}^{-f_{\text{имп}}/2} W(f) df}, \quad K_2 = \frac{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2-\Delta f_{\text{дц отн}}} f W(f) df}{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}/2-\Delta f_{\text{дц отн}}} W(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}}.$$

Если  $\Delta f_{\text{дц отн}} \leq -0,25f_{\text{имп}}$ , фрагмент второго изображения перед корреляционно-экстремальным совмещением смещается на  $\Delta y$  вниз (в сторону увеличения азимутального времени), где  $\Delta y = f_{\text{имп}}^2 / K_d$ ,  $K_d$  – доплеровская скорость. Поправка к доплеровской неопределенности вычисляется в этом случае как

$$\Delta M_{\text{дц}} = \left[ \frac{2f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta x}{(K_1 + K_2 - 1) f_{\text{имп}}^2 c R_{\perp} f_{\text{дискр}}} + \frac{\tilde{f}_{\text{дц}} - (0,5 - K_2) f_{\text{имп}}}{(K_1 + K_2 - 1) f_{\text{имп}}} \right],$$

где:

$$K_1 = -\frac{\int_{f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}} / 2} f W(f) df}{\int_{f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}}} W(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}}, \quad K_2 = \frac{\int_{-f_{\text{имп}} / 2}^{-f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}} f W(f) df}{\int_{-f_{\text{имп}} / 2}^{-f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}} W(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}} + 1.$$

Если  $\Delta f_{\text{дц отн}} \geq 0,25 f_{\text{имп}}$ , фрагмент первого изображения перед корреляционно-экстремальным совмещением смещается на  $\Delta y$  вверх (в сторону уменьшения азимутального времени). Поправка к доплеровской неопределенности вычисляется в этом случае как

$$\Delta M_{\text{дц}} = \left[ \frac{2f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta x}{(K_1 + K_2 - 1) f_{\text{имп}}^2 c R_{\perp} f_{\text{дискр}}} + \frac{\tilde{f}_{\text{дц}} + (0,5 - K_1) f_{\text{имп}}}{(K_1 + K_2 - 1) f_{\text{имп}}} \right],$$

где:

$$K_1 = -\frac{\int_{f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}} / 2} f W(f) df}{\int_{f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имп}} / 2} W(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}} + 1, \quad K_2 = \frac{\int_{-f_{\text{имп}} / 2}^{-f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}} f W(f) df}{\int_{-f_{\text{имп}} / 2}^{-f_{\text{имп}} / 2 - \Delta f_{\text{дц отн}}} W(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имп}}}.$$

На основе полученных  $f_{\text{дц отн}}$  и  $\Delta M_{\text{дц}}$  может быть рассчитано уточненное значение доплеровского центроида  $f_{\text{дц}}$  в пределах проанализированного фрагмента. Для выявления вариаций  $f_{\text{дц}}$  по полю изображений и отбраковки отдельных ошибочных оценок требуется выполнение оценок по множеству фрагментов изображений с последующей их аппроксимацией полиномом малой степени.

В случае больших начальных погрешностей  $f_{\text{дц}}$  из-за существенной деградации качества синтезированных изображений оценки относительного значения доплеровского центроида и доплеровской неопределенности могут быть недостаточно точными. Поэтому необходима организация итерационного процесса последовательного уточнения, когда после получения каждой новой уточненной оценки изображения пересинтезируются с улучшением их качества, после чего может быть получена еще более точная оценка  $f_{\text{дц}}$ .

По найденной оценке  $f_{\text{дц}}$  с учетом геометрической модели радиолокационного наблюдения могут быть найдены уточненные значения углов рысканья и тангажа.

### Уточнение угла крена

Погрешности угла крена не влияют на синтез изображения из радиограммы, но негативно отражаются на качестве радиометрической коррекции синтезированного изображения: объекты, расположенные ближе к левому краю изображения, оказываются несколько светлее (темнее) необходимого, а объекты у правого края наоборот.

Для уточнения угла крена предлагается представить наблюдаемую сцену в виде совокупности радиометрически однородных объектов разной яркости, разделенных резкими границами, и редких неоднородных объектов.

Вводится величина, зависящая от формы угломестной ДНА и не зависящая от средней яркости однородного объекта: отношение  $\delta_A(\alpha_m)$  первой производной яркости в направлении вдоль строки  $A'(\alpha_m)$  и яркости  $A(\alpha_m)$ :  $\delta_A(\alpha_m) = A'(\alpha_m)/A(\alpha_m)$ , где  $\alpha_m$  – угол места.

Эта же величина может быть выражена из угломестной ДНА  $w(\alpha_m)$ :  $\delta_w(\alpha_m) = w'(\alpha_m)/w(\alpha_m)$ .

Оценка величины  $\delta_A(\alpha_m)$  осуществляется путем статистического амплитудно-дифференциального анализа синтезированного изображения. На изображении уменьшается спекл-шум с помощью фильтра скользящего среднего единичной высоты, но значительной ширины. С помощью геометрической модели радиолокационной съемки пикселям строки сопоставляются значения  $\alpha_m$ . По каждой строке отфильтрованного изображения находится оценка  $\delta_{Ay}(\alpha_m)$  с отбраковкой пикселей, в которых оценка  $\delta_{Ay}(\alpha_m)$  существенно отличается от  $\delta_w(\alpha_m)$ . Оценки  $\delta_{Ay}(\alpha_m)$  усредняются по всем строкам с получением  $\delta_A(\alpha_m)$ .

Выполняется совмещение кривых  $\delta_A(\alpha_m)$  и  $\delta_w(\alpha_m)$ , т.е. ищется  $\Delta\alpha_m = \operatorname{argmin}_{\Delta\alpha_m} \sum_{\alpha_m} (\delta_w(\alpha_m + \Delta\alpha_m) - \delta_A(\alpha_m))^2$ . Значение  $\Delta\alpha_m$  является поправкой к углу крена.

Процесс нахождения  $\Delta\alpha_m$  также является итерационным, поскольку при изначально больших погрешностях  $\alpha_m$ , критерий отбраковки неоднородных объектов по сопоставлению  $\delta_{Ay}(\alpha_m)$  и  $\delta_w(\alpha_m)$  работает некорректно.

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования эффективности предлагаемого метода уточнения углов рысканья и тангажа выполнены с использованием радиоголограмм от космического аппарата «COSMO-SkyMed» в сравнении с подходом [7]. Для этого искусственно вносились ошибки угловой ориентации и измерялось количество итераций последовательного уточнения угловой ориентации. Исследования показали, что в рамках предлагаемого метода количество итераций сокращается в среднем в 1,34 раза. Более подробные результаты приведены в таблице 1. Также были выявлены ситуации при  $|\Delta f_{\text{дц отн}}| \approx f_{\text{имп}}/2$ , когда подход [7] не позволил выполнить уточнение, поскольку не нашлось ни одного результата корреляционно-экстремального совмещения с достаточно высоким коэффициентом корреляции Пирсона. Предлагаемый метод в этих ситуациях обеспечил возможность оценивания.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований метода уточнения углов рысканья и тангажа

$(\tilde{f}_{\text{дц}} - f_{\text{дц}})/f_{\text{имп}}$	Число итераций предложенного алгоритма	Число итераций подхода [7]
0	1	1
1	3	3
2; 3	3	4
4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	3	5
11	4	5
0,1; 1,1	3	3
2,1; 3,1; 4,1	3	4
5,1; 6,1	3	5
7,1; 8,1; 9,1; 10,1	4	5

Продолжение таблицы 1

$(\tilde{f}_{\text{дц}} - f_{\text{дц}}) / f_{\text{имп}}$	Число итераций предложенного алгоритма	Число итераций подхода [7]
11,1	4	6
0,2; 1,2	3	3
2,2; 3,2	3	5
4,2	4	4
5,2	4	5
6,2; 7,2	3	5
8,2	4	5
9,2	3	5
10,2; 11,2	3	6
-0,3; 0,7	3	4
1,7	3	5
2,7; 3,7; 4,7; 5,7	3	4
6,7	4	4
7,7	4	6
8,7	4	5
9,7	4	3
10,7	4	5
-0,5; 0,5	4	4
1,5	3	6
2,5; 3,5; 4,5	4	6
5,5	4	7
6,5	4	6
7,5	4	5
8,5; 9,5; 10,5	4	6

Экспериментальные исследования метода уточнения угла крена выполнены с использованием изображений от космического аппарата «TerraSAR-X». Для изображений обращалась процедура радиометрической коррекции, а затем искусственно вносилась погрешность угла крена. Затем применялся предложенный метод и найденное значение угла крена сопоставлялось с истинным. Результаты исследований приведены в таблице 2. Полученная среднеквадратичная ошибка угла крена составила 1,25'.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований метода уточнения угла крена

Изображение	Доля однородных объектов, %	Ошибка оценивания угла крена, угловые минуты
TSX1_SAR_SSC_SM_S_SRA_20100115T144530_20100115T144539	59,7	-0,2
TSX1_SAR_SSC_SM_S_SRA_20080704T174109_20080704T174117	60,9	-1,7
TDX1_SAR_SSC_SM_S_SRA_20120312T111906_20120312T111914	74,1	1,6
TSX1_SAR_SSC_SM_S_SRA_20120615T162057_20120615T162105	75,6	-0,5
TSX1_SAR_SSC_SM_D_SRA_20080526T053458_20080526T053507	49,5	0,3
TSX1_SAR_SSC_SM_D_SRA_20080313T221955_20080313T222003	70,7	1,5
TSX1_SAR_SSC_SM_S_SRA_20080310T133220_20080310T133228	50,1	-1,7

## Выводы

Предложенные методы уточнения угловой ориентации космического аппарата радиолокационного наблюдения Земли позволяют в 1,34 раза сократить объем трудоемких вычислений при оценивании углов рысканья и тангажа, а также получить оценку угла крена с точностью 1,25'.

## Библиографический список

1. Bamler R. Doppler frequency estimation and the Cramer-Rao bound // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1991. Vol. 29 (3). P. 385–390.
2. Madsen S.N. Estimating the Doppler centroid of SAR data // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1989. Vol. 25(2). P. 134–140.
3. Dragošević M. On accuracy of attitude estimation and Doppler tracking // Proceedings of the CEOS SAR Workshop, Toulouse, 26–29 October 1999. ESA-SP. 2000. Vol. 450. P. 127–130.
4. Bamler R., Runge H. PRF-ambiguity resolving by wavelength diversity // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1991. Vol. 29 (6). P. 997–1003.
5. Wong F.H., Cumming I.G. A combined SAR Doppler centroid estimation scheme based upon signal phase // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34 (3). P. 696–707.
6. Cumming I.G., Kavanagh P.F., Ito M.R. Resolving the Doppler ambiguity for spaceborne synthetic aperture radar // Proceedings of the IGARSS'86. 1986. P. 1639–1643.
7. Cumming I.G., Wong F.H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation. Norwood, MA: Artech house, 2005. 628 p.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## УТОЧНЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ОПОРНОМУ ОПТИЧЕСКОМУ СНИМКУ

**В.А. Ушенкин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, foton@rsreu.ru*

**Аннотация.** В работе предлагается алгоритм уточнения геодезической привязки радиолокационного спутникового изображения земной поверхности на основе корреляционно-экстремального совмещения с высокоточно привязанным опорным растровым оптическим покрытием. Алгоритм предназначен для сохранения высоких характеристик информационных продуктов радиолокационного наблюдения Земли при возникновении нештатных ситуаций на космическом аппарате, когда снижается точность навигационных измерений. Проведены экспериментальные исследования, выявившие верхнюю оценку погрешности предложенного алгоритма.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, геодезическая привязка, корреляционно-экстремальное совмещение, оптическое изображение, навигационная информация.

## SAR IMAGE GEOREFERENCE REFINEMENT USING REFERENCE OPTICAL IMAGE

**V.A. Ushenkin**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, foton@rsreu.ru*

**Abstract.** The paper proposes an algorithm for refining the geodetic reference of a spaceborne SAR image of the Earth's surface based on correlation coregistration with an accurately referenced raster optical image mosaic. The algorithm is designed to preserve high characteristics of the Earth radar observation information products in the cases of abnormal situations on a satellite, when the accuracy of navigation measurements decreases. Experimental studies have been performed that revealed the upper estimate of the proposed algorithm error.

**Keywords:** radar image, SAR raw data, primary processing, radiometric correction, attitude, satellite.

Точность геодезической привязки является одной из основных характеристик материалов космического дистанционного зондирования Земли, в том числе изображений, формируемых космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны. В оптических системах основным фактором, ограничивающим точность привязки изображений, яв-

ляются погрешности измерения направления визирования, включающие погрешности измерения угловой ориентации космического аппарата (внешние элементы ориентирования) и погрешности знания конструктивных и установочных углов съёмочной аппаратуры (внутренние элементы ориентирования). В радиолокационных системах бокового обзора с синтезом апертуры антенны требования к точности измерения углов снижаются. Привязка изображений основана на измерении наклонной дальности на траверзе и эффекте Доплера с учётом знания орбитального движения космического аппарата.

Однако в условиях импортозамещения на отечественных космических аппаратах возможно возникновение нештатных ситуаций, когда снижается точность навигационных измерений или наблюдается погрешность временной привязки пикселей радиолокационного изображения, не позволяющая корректно рассчитать дальность на траверзе и время максимального сближения наблюдавшегося объекта с радиолокатором. В таких случаях становятся актуальны технологии привязки спутниковых данных по наземным ориентирам. Для оптико-электронных космических аппаратов создано высокоточно привязанное опорное покрытие в виде мозаики снимков. Для радиолокационных систем такое покрытие отсутствует, поскольку отечественная радиолокационная спутниковая группировка находится только в начале своего формирования. Поэтому актуально создание алгоритмов автоматического уточнения привязки радиолокационных изображений по опорным оптическим снимкам.

### Теоретическая часть

Если исходная погрешность привязки превышает 10–15 м, то невозможно корректно сопоставить высоты наблюдавшихся объектов пикселям радиолокационного изображения. С учетом данного случая предлагается следующая технология уточнения привязки.

Опорное изображение, представленное в картографической проекции, с привлечением цифровой модели высот деортрансформируется в antennную или путевую систему координат, в которой синтезировано из радиоголограммы радиолокационное изображение с неточной привязкой. Поскольку опорное изображение обладает точной привязкой, для него описанное геометрическое преобразование корректно: высоты применяются ровно к тем объектам, к которым они относятся.

Затем выполняется корреляционно-экстремальное совмещение радиолокационного и деортрансформированного опорного оптического изображений. За счёт деортрансформирования остаточные геометрические рассогласования между радиолокационным и опорным изображениями должны описываться моделью с малым числом параметров. В качестве такой модели может быть принят плоскопараллельный сдвиг:

$$\mathbf{p}_p = \mathbf{b}$$

или билинейная функция:

$$\mathbf{p}_p = \mathbf{b} + p_{\text{оп}x} \mathbf{k}_x + p_{\text{оп}y} \mathbf{k}_y + p_{\text{оп}x} p_{\text{оп}y} \mathbf{k}_{xy},$$

где  $\mathbf{p}_p = \begin{pmatrix} p_{p_x} \\ p_{p_y} \end{pmatrix}$  – координаты пикселя радиолокационного изображения, соответствующего пикселию  $\mathbf{p}_{\text{оп}} = \begin{pmatrix} p_{\text{оп}x} \\ p_{\text{оп}y} \end{pmatrix}$  опорного изображения;

$\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{k}_x$ ,  $\mathbf{k}_y$  и  $\mathbf{k}_{xy}$  – параметры модели совмещения в виде векторов из двух элементов.

Радиолокационная и оптическая информации достаточно разнородные, и их совмещение – сложная задача. Корреляционно-экстремальное совмещение обладает тем преимуществом, что оно сводится к свертке фрагментов двух изображений, которая может быть эффек-

тивно реализована на основе быстрого преобразования Фурье при достаточно большой площади анализируемого фрагмента и обширной области поиска. Увеличение размера фрагмента позволяет частично скомпенсировать негативное влияние разнородности совмещаемой информации.

Тем не менее, коэффициент корреляции оптических и радиолокационных изображений крайне низкий: 0,15–0,7. При этом точка максимума коэффициента корреляции Пирсона соответствует истинному совмещению фрагментов с пиксельной точностью лишь примерно в 10–20 % случаев. В то же время малое число параметров модели совмещения позволяет применить метод наименьших квадратов и на его основе отфильтровать ложные результаты корреляционно-экстремального совмещения. Кроме того, можно осуществить дополнительную отбраковку по критерию устойчивости положения точки максимума коэффициента корреляции Пирсона к изменению размера коррелируемого фрагмента.

С учетом вышесказанного предлагается следующий алгоритм совмещения радиолокационного и деортотрансформированного опорного оптического изображений.

*Шаг 1.* Изображения приводятся к единому шагу дискретизации, величина которого выбирается так, чтобы возможная разность внутрикадровых искажений на изображениях из-за перепадов высот наблюдаемых объектов была субпиксельной. В случае метрового разрешения снимков и начальных ошибок привязки, не превышающих нескольких сотен метров, разность внутрикадровых искажений будет субпиксельной без необходимости увеличения шага дискретизации.

*Шаг 2.* Яркости пикселей радиолокационного изображения переводятся в логарифмическую шкалу:

$$r_{\log}(x, y) = \log(|r(x, y)| + 1),$$

где  $r(x, y)$  – комплексный сигнал радиолокационного изображения в антенной системе координат или амплитудный сигнал радиолокационного изображения в путевой системе координат (в зависимости от варианта синтеза изображения из радиоголографмы).

Основание логарифма может быть произвольным, поскольку коэффициент корреляции Пирсона инвариантен к линейному преобразованию яркости. Прибавляемая единица является регуляризующим членом, позволяющим избежать разрыва логарифмической функции при стремлении ее аргумента к нулю.

Радиолокационное изображение в логарифмической шкале становится больше похожим на оптическое.

*Шаг 3.* К совмещаемым изображениям применяется оператор Собеля, подчеркивающий границы объектов:

$$r_c(x, y) = \sqrt{\left( \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} * r_{\log}(x, y) \right)^2 + \left( \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} * r_{\log}(x, y) \right)^2},$$

$$o_c(x, y) = \sqrt{\left( \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} * o(x, y) \right)^2 + \left( \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} * o(x, y) \right)^2},$$

где  $*$  – операция свертки;

$o(x, y)$  – сигнал деортотрансформированного опорного оптического изображения;

$r_c(x, y)$  и  $o_c(x, y)$  – сигналы совмещаемых изображений с подчеркнутыми границами объектов.

В результате выполнения данного шага сходство совмещаемых изображений дополнительно повышается.

*Шаг 4.* Выбираются размер фрагмента для корреляции, размер области поиска и начальное значение шага между центрами соседних фрагментов (большее размера фрагмента). Выбор изначально достаточно большого шага потенциально позволяет сократить вычислительные затраты, если наблюдаемый участок земной поверхности схожим образом выглядит и в видимом, и в радиодиапазоне.

*Шаг 5.* Для каждого фрагмента выполняется корреляционно-экстремальное совмещение. Затем проверяется устойчивость положения точки максимума коэффициента корреляции Пирсона к изменению размера коррелируемого фрагмента. Для этого фрагмент для корреляции делится на 4 части. Для каждой из частей также выполняется корреляционно-экстремальное совмещение. Если для фрагмента и всех его частей максимум коэффициента корреляции превышает выбранный порог, а положения точек максимума отличаются не более чем на выбранную величину, то результаты совмещения признаются надёжными. В противном случае результаты отбраковываются.

*Шаг 6.* На основе результатов совмещения отдельных фрагментов, признанных надёжными, выполняется построение по методу наименьших квадратов функции  $\mathbf{p}_p$ . Если СКО разброса координат центров фрагментов, вовлечённых в регрессию, по какой-либо оси оказывается мало, то во избежание усиления ошибки к краям снимка соответствующий этой оси коэффициент  $k$  обнуляется, а по методу наименьших квадратов находятся значения остальных коэффициентов в  $\mathbf{p}_p$ .

*Шаг 7.* Рассчитываются СКО отклонения результатов совмещения фрагментов от функции  $\mathbf{p}_p$  по каждой из осей. Если рассчитанные СКО достаточно малы, на предыдущем шаге не выполнялось обнуление коэффициентов  $k$  и число фрагментов, вовлечённых в регрессию, достаточно велико, алгоритм завершает работу с построенной функцией  $\mathbf{p}_p$  в качестве результата. В противном случае выполняются дальнейшие шаги.

*Шаг 8.* Выполняются начальная отбраковка результатов совмещения фрагментов, отклоняющихся от  $\mathbf{p}_p$  сильнее, чем на утроенное СКО, повторное построение функции  $\mathbf{p}_p$  по меньшему числу фрагментов и пересчёт СКО. Если условие из шага 7 становится истинным, алгоритм завершает работу. В противном случае выполняются дальнейшие шаги.

*Шаг 9.* Итерационно выполняются отбраковка результатов совмещения фрагментов, отклоняющихся от  $\mathbf{p}_p$  сильнее, чем на СКО, повторное построение функции  $\mathbf{p}_p$  по меньшему числу фрагментов и пересчёт СКО, пока не будет выполнено условие из шага 7 без учёта требования к числу фрагментов. Если требование к числу фрагментов также выполнено, алгоритм завершает работу. В противном случае выполняются дальнейшие шаги.

*Шаг 10.* Уменьшается в 2 раза шаг между центрами соседних фрагментов для корреляции, и выполняется переход к шагу 5. При этом могут не перерассчитываться результаты совмещения фрагментов, уже полученные ранее для большего шага между центрами фрагментов. Если значение шага между центрами соседних фрагментов достигло минимально возможного значения, совмещение изображений признаётся неуспешным.

Если совмещение радиолокационного и опорного изображений было успешным, на основе полученных коэффициентов функции  $\mathbf{p}_p$  рассчитывается поправка к орбитальному движению космического аппарата. Орбитальное движение может быть описано моделью возмущённой орбиты [1], включающей 6 параметров (координаты и вектор скорости косми-

ческого аппарата в момент начала съёмки), рассчитываемых по методу наименьших квадратов.

Если автоматическое совмещение радиолокационного и опорного изображений было признано неуспешным, требуется уточнение привязки радиолокационного изображения с участием оператора.

### **Экспериментальные исследования**

Экспериментальные исследования алгоритма совмещения осуществлялись с использованием изображений от зарубежного радиолокационного космического аппарата «TerraSAR-X», отличающихся точностью привязки порядка 0,2 м (при наличии высокоточной опорной цифровой модели высот), оптического растрового покрытия в сервисе Google Планета Земля и цифровой модели высот Copernicus DEM.

Для 80% результатов маршрутной съёмки «TerraSAR-X», участвовавших в исследованиях, предложенный алгоритм обеспечил положительный результат совмещения, пиксельная или субпиксельная точность которого подтверждена визуальным анализом. Обнаруженные геометрические рассогласования снимков, в виде среднеквадратичного отклонения длины векторного значения функции  $p_p$  от нуля по полю снимков в пикселях и в пересчёте на земную поверхность приведены в таблице 1. Для двух радиолокационных изображений неотбракованные результаты совмещения с оптическим оказались локализованы в пределах относительно небольших областей, что не позволило построить билинейную функцию  $p_p$ , но если её заменить плоскопараллельным сдвигом на вектор  $b$ , алгоритм даёт оценку рассогласования 0,76 пикселя для одного радиолокационного изображения и 0,82 пикселя для другого.

Из-за неизвестной точности привязки снимков сервиса Google Планета Земля эти значения включают как ошибку предложенного алгоритма совмещения, так и ошибку привязки снимков сервиса Google Планета Земля, но могут рассматриваться как верхняя граница погрешностей предложенного алгоритма.

### **Выводы**

Предложенный алгоритм позволяет уменьшить ошибку привязки радиолокационного изображения до 4,3 м на основе совмещения с опорным оптическим изображением.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

№ изображения	Среднеквадратичное рассогласование	
	пиксели	метры
1	0,98	3,93
2	—	—
3	0,66	2,63
4	0,65	2,60
5	0,78	3,12
6	1,55	6,19
7	1,21	4,84
8	1,63	6,50
9	1,14	4,55
10	—	—
<b>В среднем</b>	<b>1,08</b>	<b>4,3</b>

1. Егошкин Н.А. Обработка бортовой навигационной информации для высокоточной оперативной коррекции космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 23–29.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

В.А. Ушенкин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [foton@rsreu.ru](mailto:foton@rsreu.ru)

**Аннотация.** В работе рассматриваются алгоритмы комплексирования разнородной информации, формируемой космическими системами радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли: интерферометрических и стереофотограмметрических цифровых моделей местности, радиолокационных и оптических изображений. Приводятся результаты экспериментальных исследований и примеры комплексирования.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, оптическое изображение, комплексирование, цифровая модель местности, интерферометрия, стереофотограмметрия.

## FUSION OF HETEROGENEOUS INFORMATION GENERATED BY SAR AND OPTICAL REMOTE SENSING SATELLITES

V.A. Ushenkin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [foton@rsreu.ru](mailto:foton@rsreu.ru)

**Abstract.** The paper considers algorithms for fusion of heterogeneous information generated by spaceborne systems of SAR and optical Earth observation. This information is interferometric and stereophotogrammetric digital surface models, radar and optical images. The results of experimental studies and examples of fusion are presented.

**Keywords:** radar image, optical image, fusion, digital surface model, interferometry, stereophotogrammetry.

В настоящее время для наблюдения Земли из космоса наряду с традиционными оптико-электронными системами все чаще применяются радиолокационные системы. За рубежом запущены десятки космических аппаратов (КА) и несколько спутниковых группировок радиолокационного наблюдения Земли. Федеральными космическими программами России создание систем радиолокационной съемки объявлено одним из приоритетных направлений развития дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В последние несколько лет начался запуск российских радиолокационных КА ДЗЗ, ведется активная разработка перспективных КА.

Это обусловлено рядом преимуществ радиолокационного наблюдения перед оптико-электронным. Во-первых, это возможность вести съемку независимо от погодных условий и времени суток, что особенно актуально для России, значительная часть территории которой находится за полярным кругом в условиях плохой освещенности. Во-вторых, это возможность регистрировать не только интенсивность, но также фазу и поляризацию принимаемого электромагнитного излучения, что позволяет получить новые признаки для определения геометрических и физико-химических свойств наблюдаемых объектов. В-третьих, радиоволны обладают более высокой проникающей способностью, чем видимое излучение, что позволяет наблюдать, например, земную поверхность, скрытую лесными массивами, или объекты, размещенные в укрытиях, непрозрачных в видимом диапазоне, сквозь которые успешно проходят радиоволны. В-четвертых, изображения, сформированные радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны, при наличии высокоточной информации о высотах наблюдаемых объектов могут быть более точно привязаны к геодезическим координатам, чем изображения от систем оптико-электронного наблюдения, за счет существенно меньшего негативного влияния погрешностей измерения угловой ориентации КА.

В то же время системы радиолокационного наблюдения Земли имеют и ряд недостатков. Во-первых, изображения объектов в радиодиапазоне трудны для восприятия человеком,

привыкшим наблюдать окружающий мир в видимом диапазоне. Во-вторых, за счет применения в радиолокации когерентных источников излучения и возникающего при этом явления интерференции радиолокационные изображения искажены мультиплексивным спектральным шумом. В-третьих, невозможно вести радиолокационную съемку Земли без геометрических искажений высотных объектов, т.е. отсутствует аналог съемки в надир оптико-электронными системами, из-за чего для правильного определения координат наблюдаемых объектов требуется очень точные сведения об их высоте. В-четвертых, горная местность и высотная городская застройка является очень сложными для радиолокационного наблюдения как из-за упомянутых выше геометрических искажений высотных объектов, так и из-за многочисленных переотражений радиолокационного сигнала и затенений, вызванных невозможностью вести съемку в надир.

С учетом вышеизложенного космические системы радиолокационного наблюдения Земли предназначены не для замены, а для дополнения систем оптико-электронного наблюдения. В связи с этим возникает актуальная задача комплексирования разнородной информации от обоих видов космических систем, в результате которой должны суммироваться преимущества каждого вида систем и минимизироваться их недостатки.

### **Комплексирование интерферометрических и стереофотограмметрических цифровых моделей местности**

Одной из типовых тематических задач, решаемых с использованием данных ДЗЗ, является картографирование. В рамках этой задачи по данным ДЗЗ с высокой степенью автоматизации составляются на весь мир или отдельные регионы (районы) цифровые модели местности (ЦММ).

Для формирования ЦММ в рамках задачи картографирования в оптико-электронных и радиолокационных системах используются принципиально разные подходы. В оптико-электронных системах это стереофотограмметрия – наблюдение участка земной поверхности под разными углами с получением двух или трех изображений (стереопары или триплета), для которых на основе корреляционного анализа строится карта пространственного распределения геометрических рассогласований (карта дисперсий), пересчитываемая в дальнейшем на основе модели съемки в ЦММ [1]. При стереофотограмметрической обработке возникают три основные проблемы: облачность, малоконтрастные объекты и загораживание одними объектов другими. Облачность и тени от нее необходимо автоматически детектировать и отбраковывать, в противном случае на ЦММ появляются области с высотными искажениями. Для малоконтрастных объектов (например, водной поверхности) корреляционный анализ не может правильно найти значение дисперсии. Загораживание одними объектами другими приводит к пропускам или снижению детальности ЦММ. Эта проблема решается путем замены стереопары на триплет, в котором один из снимков является надирным и не содержит загораживаний, а два других снимка получены с отклонением от надира в противоположные стороны. В отсутствие облачности применение триплетов позволяет полностью исключить пропуски данных, в противном случае требуется проведение нескольких разновременных стереосъемок с последующим объединением полученных на их основе ЦММ.

В радиолокационных системах возможно формирование ЦММ на основе подхода, близкого к стереофотограмметрии, – радаргравиметрии [2]. Однако он применяется крайне ограниченно из-за негативного влияния спектрального шума на точность и детальность получаемых ЦММ. Для формирования радаргравиметрической ЦММ приемлемого качества требуется проведение большого числа съемок одного и того же участка земной поверхности с разных витков орбиты, формирование большого количества пар изображений с последующим совместным анализом построенных карт дисперсий с целью исключения из них погрешностей, внесенных спектральным шумом.

Основным подходом к формированию ЦММ в космических радиолокационных системах ДЗЗ является интерферометрия [3]. В ее основе лежит сопоставление фаз сигналов двух комплексных радиолокационных изображений, синтезированных из радиоголограмм, полученных с близких квазипараллельных орбит.

Разность фаз сигнала в одноименных пикселях изображений интерферометрической пары включает несколько составляющих, одной из которых является топографическая фаза, квазипропорциональная высоте наблюдаемого объекта. Задача интерферометрической обработки – вычленение топографической фазы для ее последующего пересчета в высоту и устранение всех остальных составляющих разности фаз. Наиболее проблемной составляющей являются атмосферные искажения фазы, обусловленные пространственными вариациями изменения метеопараметров за период между съемками двух изображений. При синхронной интерферометрической съемке они полностью исключаются, а при двухпроходной интерферометрии являются одним из основных источников ошибок определения высот.

Другой проблемой интерферометрии является восстановление абсолютных значений топографической фазы, в то время как из-за периодического характера фазы изначально известны лишь относительные значения, свернутые по модулю  $2\pi$ . Перед пересчетом в высоту к свернутым значениям необходимо прибавить некоторое целое количество периодов волны излучения. Эта задача, называемая развертыванием фазы, является некорректно поставленной, поскольку имеет бесконечное множество решений, из которых необходимо выбрать единственное соответствующее истинным высотам наблюдаемых объектов. Данный выбор обычно осуществляют на основе ряда эвристических критериев, которые строго выполняются преимущественно для равнинной местности, а при наличии большого количества высотных объектов с резкими границами нарушаются, приводя к ошибкам определения высоты, кратным периоду неоднозначности, составляющему обычно в зависимости от условий интерферометрической съемки порядка 20–100 м.

Несмотря на перечисленные проблемы, радиолокационная интерферометрия обеспечивает более высокую точность формирования ЦММ, чем радаргамметрия. Кроме того, она имеет ряд преимуществ перед стереофотограмметрией, применяемой в оптико-электронных системах. Во-первых, интерферометрия лучше работает с малоконтрастными объектами. Во-вторых, она более устойчива к негативному влиянию облачности. Синхронная интерферометрия является всепогодной и позволяет строить ЦММ в районах, практически круглый год закрытых облачностью. При двухпроходной интерферометрии наличие облачности приводит к ошибкам определения высоты величиной в единицы или десятки метров, но это всё равно гораздо лучше, чем при стереофотограмметрии, которая вместо высоты объекта наблюдения выдает высоту загораживающего его облака, составляющую сотни метров или единицы километров. В то же время стереофотограмметрия, особенно в случае обработки триплетов, обеспечивает более качественный результат в горной местности и для высотной городской застройки, где при радиолокационной интерферометрии возникает множество переналожений, затенений и ошибок развертывания фазы.

С учетом рассмотренных сильных и слабых сторон радиолокационной интерферометрии и оптико-электронной стереофотограмметрии в [4] предложен комплексирования интерферометрических и стереофотограмметрических ЦММ на примере Copernicus DEM GLO-30 и ALOS World 3D 30. Он основан на привлечении электронных карт для определения расположения районов высотной застройки, наиболее проблемных для интерферометрии.

Поскольку электронные карты и комплексируемые ЦММ являются недостаточно точными в части привязки к геодезическим координатам, выполняется уточнение границ высотных объектов путем анализа стереофотограмметрической ЦММ.

Пусть положение высотных объектов описывается бинарной маской, тогда алгоритм ее уточнения следующий.

В окрестности каждого нулевого пикселя маски выполняется классификация пикселей на пиксели рельефа и пиксели наземных объектов. К рельефу относятся пиксели с нулевым значением маски, все смежные пиксели которых также нулевые. Остальные пиксели признаются пикселями наземных объектов.

Если во вторую группу попал хотя бы один пиксель окрестности, анализируется количество пикселей в первой группе. Если оно меньше заданного порога, нулевой пиксель маски заменяется единичным. В противном случае в пределах каждой группы пикселей рассчитываются:

1) модуль разности средней высоты на стереофотограмметрической ЦММ в пределах группы пикселей и высоты на интерферометрической ЦММ, соответствующей анализируемому нулевому пикслю маски;

2) модуль средней разности высот на стереофотограмметрической и интерферометрической ЦММ в пределах группы пикселей.

Также оценивается модуль разности высот на ЦММ, соответствующих анализируемому нулевому пикслю маски.

Нулевой пиксель маски заменяется единичным, если:

1) модуль разности средней высоты на стереофотограмметрической ЦММ в пределах пикселей рельефа и высоты на интерферометрической ЦММ, соответствующей анализируемому нулевому пикслю маски, превышает выбранный порог;

2) модуль разности средней высоты на стереофотограмметрической ЦММ в пределах пикселей наземных объектов и высоты на интерферометрической ЦММ, соответствующей анализируемому нулевому пикслю маски, меньше модуля разности средней высоты на стереофотограмметрической ЦММ в пределах пикселей рельефа и высоты на интерферометрической ЦММ, соответствующей анализируемому нулевому пикслю маски;

3) модуль разности высот на ЦММ, соответствующих анализируемому нулевому пикслю маски, превышает модуль средней разности высот на ЦММ в пределах пикселей рельефа сильнее, чем на выбранный порог;

4) модуль средней разности высот на ЦММ в пределах пикселей наземных объектов превышает модуль средней разности высот на ЦММ в пределах пикселей рельефа сильнее, чем на выбранный порог.

Указанный процесс коррекции маски выполняется в несколько итераций. Число итераций, размеры окрестности и значения порогов подбираются эмпирическим путем так, чтобы единичные пиксели скорректированной маски покрыли большую часть высотных объектов, представленных в городских районах на стереофотограмметрической ЦММ.

Далее выполняется комплексирование ЦММ, при котором участки на интерферометрической ЦММ, соответствующие единичным пикселям  $\omega_{mn}$  сформированной бинарной маски, заполняются данными стереофотограмметрической ЦММ с обеспечением бесшовнойстыковки на границах участков на основе применения корректирующей поверхности и интерполяции по методу обратных взвешенных расстояний [5].

### **Комплексирование радиолокационных и оптических изображений**

Изображения, формируемые радиолокационными системами ДЗЗ, крайне специфичны и трудны для визуального восприятия человеком, привыкшим наблюдать окружающий мир в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Поэтому актуальна задача представления радиолокационной информации в более привычном для человека виде с использованием изображений от систем оптико-электронной съемки.

В [6] предложены два новых алгоритма комплексирования радиолокационного и оптического изображений, предназначенных для облегчения дешифрации радиолокационных данных.

В первом алгоритме выделяются наиболее яркие объекты на радиолокационном изображении, которые обычно в первую очередь интересуют дешифровщика, и переносятся на подложку в виде оптического снимка, геометрически точно совмещенного с радиолокационным. Наблюдая яркие радиолокационные отклики на привычном фоне, человек может с большей легкостью распознать объекты, представленные этими откликами, и оценить их расположение на окружающей местности.

Во втором алгоритме берется оптический спектрозональный снимок в естественных цветах, геометрически точно совмешенный с радиолокационным, и по нему раскрашивается радиолокационное изображение, традиционно представляющее в оттенках серого. В результате получается изображение, яркость которого соответствует рассеянию излучения в радиодиапазоне, а цвет – отражающим характеристикам объектов в видимом диапазоне электромагнитного спектра.

Комплексирование в рамках первого алгоритма может быть описано следующим выражением:

$$F_b(x, y) = \begin{cases} O_b(x, y), & BЧ\{R(x, y)\} < k \cdot HЧ\{R(x, y)\}, \\ O_b(x, y) + \frac{BЧ\{R(x, y)\} \cdot HЧ\{O_b(x, y)\}}{(1+k)HЧ\{R(x, y)\}}, & BЧ\{R(x, y)\} \geq k \cdot HЧ\{R(x, y)\}, \end{cases}$$

где  $O_b(x, y)$  –  $b$ -й спектральный канал оптического снимка;

$R(x, y)$  – радиолокационное изображение;

$HЧ$  – низкочастотная составляющая;

$BЧ$  – высокочастотная составляющая сигнала;

$k$  – параметр алгоритма, подбираемый эмпирическим путем.

Комплексирование в рамках второго алгоритма выполняется в цветовом пространстве HSV и описывается следующими выражениями:

$$H_F(x, y) = H(x, y),$$

$$S_F(x, y) = \begin{cases} S(x, y) \sqrt{\frac{V(x, y)}{V_m}}, & V(x, y) < V_m, \\ S(x, y), & V(x, y) \geq V_m, \end{cases}$$

$$V_F(x, y) = \log(R(x, y) + 1),$$

где  $H(x, y)$ ,  $S(x, y)$  и  $V(x, y)$  – результаты преобразования исходного оптического изображения в пространство HSV;

$H_F(x, y)$ ,  $S_F(x, y)$  и  $V_F(x, y)$  – результат комплексирования в пространстве HSV.

### Экспериментальные исследования

Пример результата комплексирования интерферометрической и стереофотограмметрической ЦММ приведен на рисунке 1.

Пример результата первого алгоритма комплексирования радиолокационного и оптического изображения приведен на рисунке 2.

Пример результата второго алгоритма комплексирования радиолокационного и оптического изображения приведен на рисунке 3.

## Выводы

Рассмотренные алгоритмы комплексирования позволяют получить информацию, объединяющую достоинства радиолокационных и оптико-электронных систем ДЗЗ.



Рис. 1. Интерферометрическая ЦММ (слева), стереофотограмметрическая ЦММ (по центру) и результат комплексирования (справа)



Рис. 2. Радиолокационное изображение (слева), оптическое изображение (по центру) и результат комплексирования (справа)

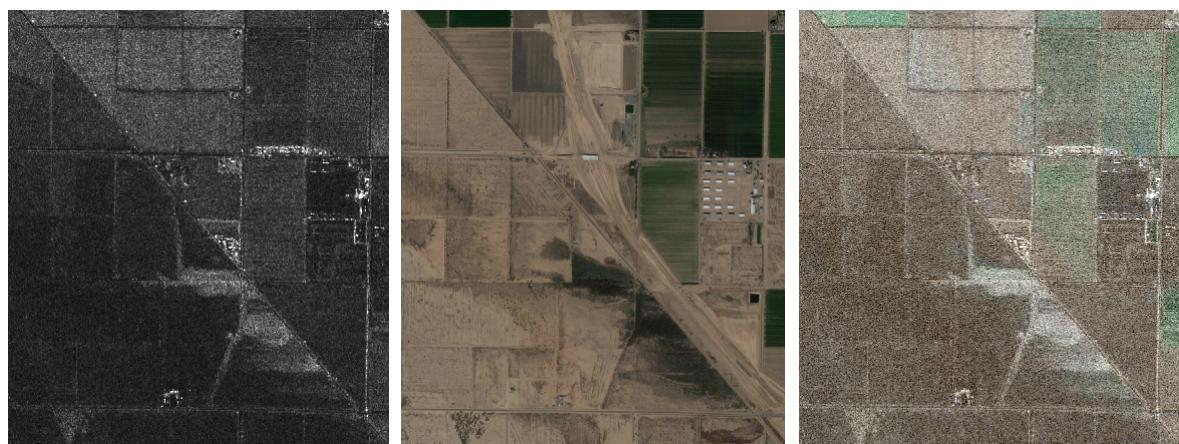


Рис. 3. Радиолокационное изображение (слева), оптическое изображение (по центру) и результат раскраски (справа)

## Библиографический список

1. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Программно-математическое обеспечение системы обработки космических стереоизображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 27. С. 17–22.
2. Méric S., Fayard F., Pottier É. Radargrammetric SAR image processing // Geoscience and Remote Sensing / edited by P.-G. P. Ho. 2009. P. 421–454.
3. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 208–219.
4. Ушенкин В.А., Ларюков С.А. Комплексирование интерферометрической и стереофотограмметрической цифровых моделей местности GLO-30 и AW3D30 // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 40–43.
5. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Комплексирование цифровых моделей рельефа с целью повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 13–17.
6. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексирование радиолокационных и оптических изображений от космических систем дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 5-2. С. 183–191.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## МОДИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ НИЗКОДЕТАЛЬНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.А. Ушенкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, foton@rsreu.ru*

**Аннотация.** В работе рассматривается задача интерферометрической обработки информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли с целью формирования цифровых моделей высот. Анализируется возможность привлечения низкодетальной стереофотограмметрической информации с целью повышения точности интерферометрической обработки. В классическую технологическую схему интерферометрии добавляются новые операции по коррекции атмосферных искажений, дополнительной фильтрации шумов, отбраковки участков с переналожением сигналов и областей радиотени. Приводятся результаты экспериментальных исследований, иллюстрирующие повышение точности формируемых цифровых моделей высот.

**Ключевые слова:** радиолокационная информация, интерферометрическая обработка, стереофотограмметрическая информация, цифровая модель высот.

## MODIFIED TECHNOLOGICAL SCHEME OF INTERFEROMETRIC PROCESSING OF INFORMATION FROM SAR SYSTEMS FOR EARTH OBSERVATION WITH THE USE OF LOW-DETAIL STEREOPHOTOGRAMMETRIC INFORMATION

V.A. Ushenkin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, foton@rsreu.ru*

**Abstract.** The paper considers the problem of interferometric processing of information from spaceborne radar systems for Earth observation in order to generate digital elevation models. The possibility of using low-detail stereophotogrammetric information to improve the accuracy of interferometric processing is analyzed. New operations for correcting atmospheric distortions, additional noise filtration, and rejecting areas with signal overlap and radio shadow areas are added to the classical technological scheme of interferometry. The results of experimental studies illustrating the improvement in the accuracy of the generated digital elevation models are presented.

*Keywords:* SAR data, interferometric processing, stereophotogrammetric data, digital elevation model.

Обработка топографических интерферограмм, полученных из пары изображений от космических систем радиолокационного наблюдения Земли, позволяет сформировать цифровую модель высот наблюданного участка земной поверхности: цифровую модель рельефа при отсутствии искусственных высотных объектов и лесного покрова или цифровую модель местности (поверхности) в противном случае.

Традиционно интерферометрическая обработка включает следующие этапы:

- 1) определение параметров геометрического соответствия двух исходных комплексных радиолокационных изображений;
- 2) трансформацию дополнительного радиолокационного изображения в координаты основного;
- 3) формирование фазоразностного изображения – интерферограммы;
- 4) расчет интерферометрической базы;
- 5) вычитание из интерферограммы фазы плоского рельефа с учетом интерферометрической базы;
- 6) оценку когерентности – степени зашумленности фазы на интерферограмме;
- 7) фильтрацию шумов на интерферограмме;
- 8) развертывание фазы – восстановление истинных ее значений из свернутых по модулю  $2\pi$ ;
- 9) пересчет развернутой фазы в высоту с учетом интерферометрической базы;
- 10) трансформацию полученной матрицы высот в заданную картографическую проекцию.

Погрешности промежуточных результатов на выходе каждого этапа приводят к снижению точности конечной цифровой модели высот или даже к невозможности выполнения дальнейших этапов обработки. Поэтому актуальны исследования по модификации традиционной технологии интерферометрической обработки в части введения дополнительных этапов по устранению тех или иных погрешностей. Значительная часть искажающих факторов сильно коррелирует с высотой наблюдавших объектов, поэтому для их устранения целесообразно привлечение опорных цифровых моделей высот, более грубых, чем формируемая в результате интерферометрической обработки. В настоящее время имеются два основных метода формирования цифровых моделей высот по спутниковым снимкам: радиолокационная интерферометрия и оптико-электронная стереофотограмметрия [1]. Для использования в качестве опорной информации при интерферометрической обработке предпочтительны стереофотограмметрические цифровые модели высот, поскольку они предоставляют дополнительные сведения об участках земной поверхности, сложных для радиолокационного наблюдения: высотной городской застройке и горной местности.

### **Теоретическая часть**

Развертывание фазы является наиболее сложным этапом интерферометрической обработки и сводится к некорректно поставленной задаче восстановления истинных значений фазы по относительным значениям, свернутым по модулю  $2\pi$  и отличающимся от истинных на некоторое целое количество периодов волны излучения. Данная задача имеет бесконечное множество решений, только одно из которых соответствует истинным высотам наблюдавших объектов. Для выбора этого решения применяются различные эвристические предположения, которые редко нарушаются реальным рельефом, но могут часто нарушаться из-за остаточных искажений сигнала интерферограммы, поданного на вход процедуры развертывания фазы. Поэтому необходима наиболее тщательная подготовка интерферограммы перед развертыванием фазы на ней.

Одним из источников искажений является эффект переналожения сигналов из-за перепадов высот наблюдаемых объектов и бокового радиолокационного обзора. Для развертки изображения вдоль строки используется увеличение наклонной дальности, однако для высотных объектов наклонная дальность уменьшается, из-за чего сигнал от более высоких объектов накладывается на сигнал от более низких. Амплитуда сигнала в результате переналожения усиливается, а фаза претерпевает некоторые искажения, характер которых зависит от соотношения радиояркостей высотных и низких объектов.

Для качественного выявления областей переналожения необходимо знание высот наблюдаемых объектов, которые и являются искомыми величинами при интерферометрической обработке. В то же время можно приблизенно найти расположение областей переналожения за счет привлечения низкодетальных опорных стереофотограмметрических данных.

Приближенная карта переналожений может быть составлена при трансформации опорной модели высот в систему координат основного радиолокационного изображения интерферометрической пары в соответствии со следующим алгоритмом:

1) для каждой строки основного радиолокационного изображения в направлении увеличения наклонной дальности последовательно находятся трансформированные высоты; для пикселя строки с минимальной дальностью в качестве начального значения итерационного поиска высоты выбирается минимально возможное значение высоты, а для последующих пикселей – значение высоты, найденное для предыдущего пикселя;

2) шаг 1 повторяется, но уже в направлении уменьшения наклонной дальности, при этом для пикселя с максимальной дальностью в качестве начального значения выбирается максимальное возможное значение высоты, а для последующих пикселей – значение высоты, найденное для предыдущего пикселя;

3) пиксели, для которых высоты, найденные на шагах 1 и 2, отличаются сильнее, чем на величину погрешности, признаются принадлежащими области переналожения.

Сигнал в пикселях интерферограммы, принадлежащих выявленным областям переналожения, отбраковывается путем назначения ему нулевых весовых коэффициентов на этапе развертывания фазы.

Участкам, попавшим в радиотень, обычно соответствуют слабый уровень сигнала на радиолокационном изображении и низкая когерентность на интерферограмме. Однако возможны ситуации, когда сигнал в области радиотени будет иметь достаточно высокую когерентность, при этом не описывая реальные высоты наблюдаемых объектов. Поэтому целесообразно в дополнение к отбраковке по критерию низкой когерентности ввести в технологическую схему интерферометрической обработки этап выявления и отбраковки областей радиотени. Так же, как и в случае с переналожениями, для выявления затенений можно привлечь низкодетальную опорную стереофотограмметрическую модель высот. Выявление затенений осуществляется на основе трассировки лучей вдоль строки основного радиолокационного изображения. Сигнал в теневых пикселях интерферограммы отбраковывается путем назначения нулевых весовых коэффициентов на этапе развертывания фазы.

Маска переналожений, построенная по опорным стереофотограмметрическим данным, является недостаточно точной из-за их низкой детальности, поэтому она может не охватывать некоторую часть реальных переналожений, искажающих сигнал интерферограммы. Часть этих остаточных переналожений, характеризующуюся наиболее сильными искажениями, можно дополнительно выявить путем анализа фазы на интерферограмме.

Не все изменения фазы вдоль строки интерферограммы допустимы с точки зрения геометрической модели интерферометрической съемки. Изменение фазы, соответствующее резкому уменьшению высоты в направлении увеличения наклонной дальности, является недопустимым, поскольку в этом случае более дальний пиксель должен был бы попасть в область радиотени и не содержать полезный сигнал. Пиксели с такими недопустимыми изме-

нениями фазы выявляются и отбраковываются путем назначения нулевых весовых коэффициентов на этапе развертывания фазы.

Перед выполнением развертывания фазы должен быть максимально отфильтрован фазовый шум на интерферограмме. Наиболее качественное удаление шума среди известных алгоритмов обеспечивает алгоритм Голдштейна [2, 3], основанный на адаптивной полосовой фильтрации. Однако после применения фильтра Голдштейна остается небольшое количество импульсных шумов. В то же время в [4] предложена адаптация медианного фильтра, позволяющая его применять к периодическому фазовому сигналу интерферограммы. Поэтому в технологическую схему интерферометрической обработки целесообразно добавить этап дополнительной медианной фильтрации интерферограммы, позволяющей устраниТЬ остаточный импульсный шум, снизить количество сингулярных точек и тем самым упростить последующее развертывание фазы.

Адаптация медианного фильтра основана на преобразовании периодических значений фазы на интерферограмме к упорядочиваемым значениям. В основу преобразования положено предположение, что в пределах малой окрестности полезный сигнал интерферограммы изменяется практически линейно, т.е. его отклонения от аппроксимирующей линейной зависимости не превышают половину фазового периода. Поэтому медианская фильтрация интерферограммы для каждого малого фрагмента заключается в построении линейной аппроксимации сигнала, вычитании из сигнала полученной аппроксимации, применении медианного фильтра к результату вычитания и обратного прибавления линейной аппроксимации.

В [4, 5] предложен подход к развертыванию фазы на основе анализа сюжета интерферограммы и привлечения опорной низкодетальной модели высот, гарантирующий, что ошибки развертывания фазы будут распространяться не более, чем на несколько пикселей низкодетальных опорных данных. В [6] точность подхода была дополнительно увеличена за счет добавления процедуры уточнения положения фазовых разрывов с целью уменьшения локальных ошибок. Для корректной работы развертывания фазы в соответствии с таким подходом на интерферограмме должны отсутствовать атмосферные искажения фазы.

За счет того, что состояние атмосферы изменяется в пространстве плавно, основные атмосферные искажения сосредоточены в низкочастотной составляющей сигнала интерферограммы, которая априорно известна по низкодетальным стереофотограмметрическим моделям высот. Поэтому устранение атмосферных искажений заключается в подавлении низких частот на результате вычитания из интерферограммы фазовой картины опорной стереофотограмметрической модели высот.

### Экспериментальные исследования

Проведены экспериментальные исследования предложенной технологической схемы в сравнении со схемой, предложенной в рамках метода [7]. Результаты исследований для трех интерферометрических пар приведены в таблице 1. Видно, что предложенная схема позволяет в 1,8–3,8 раз увеличить точность формирования цифровых моделей высот.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

№ интерферометрической пары	Среднеквадратичная ошибка высоты, м	
	Схема в рамках метода [7]	Предлагаемая схема
1	3,342	1,818
2	4,802	1,724
3	18,69	4,956

## Выводы

Предложенная технологическая схема интерферометрической обработки за счет введения дополнительных операций позволяет лучше подготовить интерферограмму к этапу развертывания фазы и тем самым увеличить 1,8–3,8 раз точность формируемых цифровых моделей высот.

## Библиографический список

1. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Информационная технология стереофотограмметрической обработки видеоданных от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 44-49.
2. Goldstein R.M., Werner C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25 (21). P. 4035–4038.
3. Baran I., Stewart M.P., Kampes B.M., Perski Z., Lilly P. A modification to the Goldstein radar interferogram filter // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41(9). P. 2114–2118.
4. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 21–31.
5. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развертывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съемки Земли // Радиотехника. 2016. № 11. С. 120–127.
6. Ушенкин В.А. Алгоритмы высокоточной обработки интерферометрической информации от систем дистанционного зондирования Земли на основе 3D-анализа наблюдаемой сцены: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2017. 165 с.
7. Егошкин Н.А. Методы высокоточной геометрической обработки информации от современных систем космического зондирования Земли: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2019. 323 с.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

## УСТРАНЕНИЕ ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИИ ПУТЁМ ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИИ

И.А. Чесных

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [igor.chesnyx@mail.ru](mailto:igor.chesnyx@mail.ru)

**Аннотация.** В работе рассмотрен алгоритм коррекции белого шума на изображениях с помощью вейвлет-преобразования Хаара. На языке программирования C++ написана программа, которая позволяет раскладывать исходное изображение до любого уровня вейвлета Хаара. Устранение шума производится путем пороговой фильтрации высокочастотных составляющих первого уровня вейвлет-преобразования Хаара. Предложенный алгоритм позволяет устраниТЬ значительное количество помех на исходном изображении.

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование, вейвлет Хаара, пороговая фильтрация.

## DENOISING IMAGES VIA WAVELET FILTERING

I.A. Chesnykh

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [igor.chesnyx@mail.ru](mailto:igor.chesnyx@mail.ru)

**Abstract.** This paper explores an algorithm for correcting white noise in images using the Haar wavelet transform. A C++ program has been developed that allows for the decomposition of an input image to an arbitrary level using the Haar wavelet. Noise reduction is achieved through thresholding the high-frequency components of the first-level Haar wavelet transform. The proposed algorithm effectively eliminates a significant amount of noise from the original image.

**Keywords:** wavelet transform, Haar wavelet, thresholding

## Введение

Снимки со спутников не всегда получаются качественными и могут быть зашумлены импульсными помехами. Существует достаточно много фильтров, позволяющих подавить этот шум, но при их применении теряется значительное количество полезной информации.

При вейвлет-разложении изображения формируются четыре компонента, на каждом из которых отчётливо выделяются отдельные частоты исходного снимка. В итоге, шум на них будет отличаться от фона и других объектов изображения, и его фильтрация не приведёт к серьёзной потере исходной значимой информации. С подавлением шума не вейвлет-компоненте неплохо справился пороговый фильтр, суть которого заключается в усреднении пикселей компонента, если они сильно отклоняются от заданного порога. После фильтрации происходит восстановление исходного изображения путём обратного вейвлет-преобразования.

## Алгоритм прямого вейвлет-преобразования Хаара

Исходное изображение  $A(x, y)$  ( $x = \overline{1, X}$  - номер столбца,  $y = \overline{1, Y}$  - номер строки) делится на блоки размером  $2 \times 2$  пикселя. Далее в каждом блоке вычисляется значение пикселей четырех компонент вейвлет-разложения  $LL(i, j), HL(i, j), LH(i, j), HH(i, j)$   $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , ширина и высота которых будут в 2 раза меньше исходного:  $I = X/2; J = Y/2$  [1]:

$$\begin{aligned} LL(i, j) &= [A(2i, 2j) + A(2i+1, 2j) + A(2i, 2j+1) + A(2i+1, 2j+1)]/4; \\ LH(i, j) &= |A(2i+1, 2j) - A(2i, 2j)|; \\ HL(i, j) &= |A(2i, 2j+1) - A(2i, 2j)|; \\ HH(i, j) &= |A(2i+1, 2j+1) - A(2i, 2j)|. \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим на примере одного блока разложение Хаара. Пусть исходный блок имеет следующие значения:

1	2
7	8

Четыре вейвлет-компоненты формируются следующим образом:

1. LL-компоненты берётся как среднее арифметическое значение из блока  $2 \times 2$ :  

$$(1 + 2 + 7 + 8) / 4$$
2. LH-компонента формируется из модуля разности «правого верхнего» и «левого верхнего» пикселя в блоке:  

$$|2 - 1|$$
3. HL-компонента формируется из модуля разности «левого нижнего» и «левого верхнего» пикселя в блоке:  

$$|7 - 1|$$
4. HH-компонента формируется из модуля разности «правого нижнего» и «правого верхнего» пикселя в блоке:  

$$|8 - 1|$$

В результате в LL компоненте получается низкочастотная составляющая исходного снимка, а в остальных компонентах будут получаться высокочастотные составляющие, в которых хорошо выделяются различные резкие переходы, в том числе и шум (рис. 1) [1, 2].

## Алгоритм обратного вейвлет-преобразования Хаара

На основе (1) можно получить выражения для обратного расчета:

$$\begin{aligned}
 A(x, y) &= LL(0.5x, 0.5y) - \frac{HL(0.5x, 0.5y) + LH(0.5x, 0.5y) + HH(0.5x, 0.5y)}{4}; \\
 A(x+1, y) &= A(x, y) + LH(0.5x, 0.5y); \\
 A(x, y+1) &= A(x, y) + HL(0.5x, 0.5y); \\
 A(x+1, y+1) &= A(x, y) + HH(0.5x, 0.5y).
 \end{aligned} \tag{2}$$

### Алгоритм фильтрации

Фильтрация применяется к высокочастотным компонентам первого уровня вейвлет-разложения, после чего выполняется обратное преобразование Хаара, т.е. восстановление исходного изображения по четырём компонентам первого уровня разложения.

Коррекции подвергаются вейвлет-коэффициенты, удовлетворяющие следующему условию:

$$\begin{cases} LH(i, j) > P_{LH}, \\ HL(i, j) > P_{HL}, \\ HH(i, j) > P_{HH}, \end{cases} \tag{3}$$

где  $P_{LH}$ ,  $P_{HL}$ ,  $P_{HH}$  - пороги фильтрации,  $i = 0.5x$ ,  $j = 0.5y$ .

Если элемент испорченный, то первый элемент исходного снимка из (2) вычисляется с поправкой:

$$A(x, y) = LL(0.5x, 0.5y) - \frac{7[HL(0.5x, 0.5y) + LH(0.5x, 0.5y) + HH(0.5x, 0.5y)]}{12}. \tag{4}$$

Вычисление остальных элементов производится аналогично (2).

На рисунке 1 представлен пример исходного зашумленного изображения, на рисунке 2 -  $LH$ -компоненты его вейвлет-разложения, на рисунке 3 - результат фильтрации.

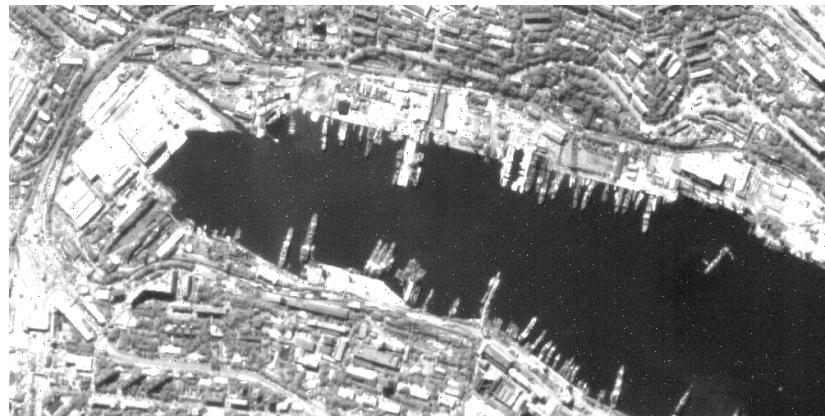


Рис. 1. Исходное изображение с шумом

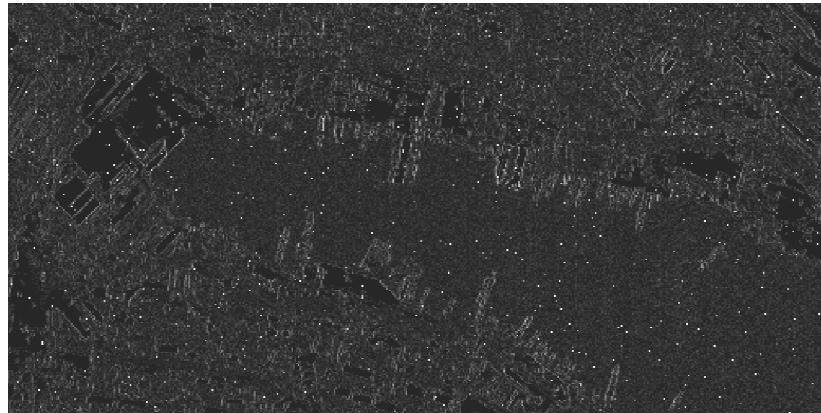


Рис. 2. Высокочастотная компонента вейвлет-разложения первого уровня

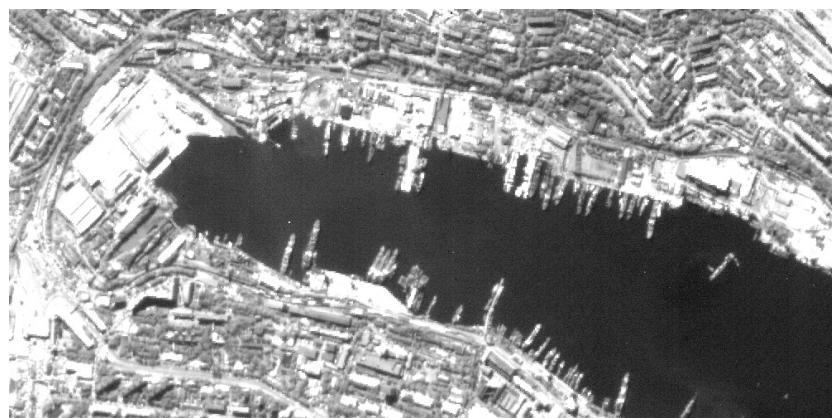


Рис. 3. Результат фильтрации

### Оценка эффективности фильтрации

Качество фильтрации оценивалось путем сопоставления среднеквадратического отклонения (СКО), вычисленного по разности исходного (незашумленного) изображения и обработанного снимка, и СКО, вычисленного по разности исходного и зашумленного изображений [3].

В результате на приведенном примере первое СКО (15.12) оказалось значительно меньше второго (96.48), что подтверждает эффективность предложенного алгоритма.

Отсутствие идеального результата связано с погрешностью алгоритма, поскольку помимо удаления шума он может затрагивать «неповреждённые» пиксели в местах резких перепадов значений цветов (различные границы объектов и др.). Но если требуется улучшить общее визуальное качество изображения, то эта погрешность не является критичной.

### Библиографический список

1. <https://habr.com/ru/articles/168517/> Вейвлет-сжатие. Виды вейвлет преобразований.
2. <https://habr.com/ru/articles/196578/> - Работа с растровыми.bmp изображениями.
3. <https://www.geeksforgeeks.org/cpp-program-to-find-the-standard-deviation-of-array-elements/> - Find the StandartDeviation of Array Elements in C++.

УДК 004.627; ГРНТИ 50.05.03

## ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИ КОРРЕКЦИИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

К.И. Соколов\*, Н.В. Макарова\*\*

\* Военное представительство, Российская Федерация, Рязань, skisokolow@yandex.ru

\*\*Рязанский государственный радиотехнический университет

имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, makarova.n.v@rsreu.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается алгоритм построения оптимального дерева вейвлет-пакетного разложения спутниковых изображений в задаче коррекции структурного радиометрического шума. Предложен критерий «компактности» изображений, по которому принимается решение о дальнейшем направлении вейвлет-разложения. Рассмотрены особенности построения дерева решений для спутниковых снимков.

**Ключевые слова:** структурный шум, вейвлет-пакетное преобразование, дерево решений.

## CONSTRUCTION OF WAVELET-PACKET DECOMPOSITION TREE WHEN CORRECTING RADIOMETRIC NOISE IN IMAGES

K.I. Sokolov\*, N.V. Makarova\*\*

\* Military representation, Russia, Ryazan, skisokolow@yandex.ru

\*\* Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,

Russia, Ryazan, makarova.n.v@rsreu.ru

*The summary.* The paper considers an algorithm for constructing an optimal tree for wavelet-packet decomposition of satellite images in the problem of correcting structural radiometric noise. A criterion for the «compactness» of images is proposed, according to which a decision is made on the further direction of wavelet decomposition. Features of constructing a decision tree for satellite images are considered.

**Keywords:** structural noise, wavelet packet transform, decision tree.

В современных системах дистанционного зондирования Земли при сканировании земной поверхности часто возникают радиометрические искажения в виде структурного шума («полосатости»). Одним из способов коррекции таких искажений являются вейвлет-преобразования.

При классическом вейвлет-преобразовании на каждом шаге происходит расщепление (разложение) сигнала на высокочастотную (ВЧ) и низкочастотную (НЧ) составляющие и отсечение ВЧ составляющей из предположения, что НЧ содержит больше информации об исходном сигнале [1]. В результате получается «однобокое» дерево. Если процесс расщепления продолжить как для НЧ, так и для ВЧ составляющих сигнала, получается «полное» дерево. Ветвям дерева соответствует набор подпространств сигнала с базисами, построенными как для «однобокого» дерева. Функции и фильтры, порождающие эти базисы, называются вейвлет-пакетами.

Пусть  $B(m, n)$  – исходное изображение,  $m = \overline{1, M}$  – номер строки в изображении,  $n = \overline{1, N}$  – номер столбца. Низкочастотную фильтрацию обозначим как  $L$ , высокочастотную – как  $H$ . В результате вейвлет-преобразования  $B(m, n)$  формируются четыре изображения:

- 1)  $B_{LL}(m, n)$  – НЧ составляющая по строкам ( $m$ ) и по столбцам ( $n$ );
- 2)  $B_{HL}(m, n)$  – ВЧ по  $m$  и НЧ по  $n$ ;
- 3)  $B_{LH}(m, n)$  – НЧ по  $m$  и ВЧ по  $n$ ;
- 4)  $B_{HH}(m, n)$  – ВЧ по  $m$  и  $n$ .

В «однобоком» дереве дальнейшему преобразованию подвергается только  $B_{LL}(m, n)$  составляющая, в «полном» дереве все четыре.

При коррекции структурного шума «полное» дерево избыточно, а «однобокое» дерево – бесполезно, поскольку вейвлет-разложения «по горизонтали» (по  $n$ ) практически не содержат полос. Это связано с тем, что структурный шум порождается отдельными фотоприемными элементами, он описывается строго аддитивной времязависимой моделью и проявляется в изменении только средней яркости столбцов [2].

Для наиболее адекватного представления структурных искажений необходимо построить «оптимальное» дерево вейвлет-разложения, на каждом уровне которого производится анализ полученных составляющих и принятие решения о дальнейшем разложении с учетом введенного критерия [3]. При этом обычно решается задача наиболее полного (например, в смысле сохранения нормы) описания изображения достаточно малым количеством разложений. Остальные вейвлет-составляющие считаются не важными, содержащими в основном шум, их можно «отбросить» – обнулить или снизить амплитуду. Тогда при применении обратного преобразования восстановленное изображение окажется соответственно отфильтрованным.

Если  $b_k(m,n)$  – входное изображение на уровне  $k$ , то можно принять решение о вейвлет-разложении по  $m$ , по  $n$  или отказаться от разложения. Если принято решение о разложении, то для каждого из результирующих изображений уровней  $(k+1)$  необходимо опять сделать выбор. Получается «оптимальное» дерево принятия решений (связный ориентированный граф без циклов) (рисунок 1). На вершине дерева – исходное изображение. Дугами являются элементарные вейвлет-преобразования по  $m$  или по  $n$ . «Листьями» дерева выступают изображения, которые далее не раскладываются.

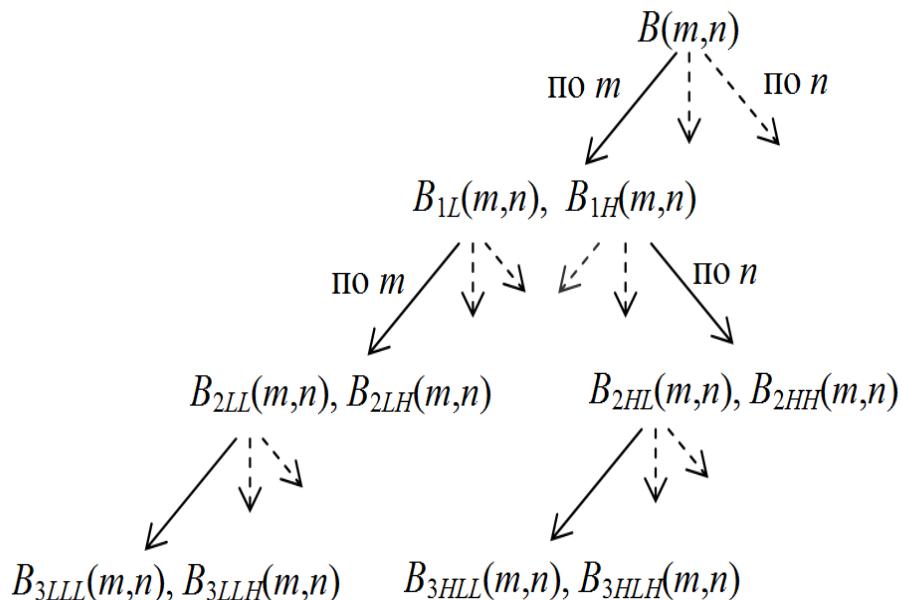


Рис. 1. Дерево принятия решений о разложении при использовании вейвлет-пакетов

Пусть  $b_k(m,n)$  – изображение. Введём меру его «компактности» как

$$A(b_k) = \sum_{(m,n) \in \Omega_{bk}} b_k^2(m,n), \quad (1)$$

где  $\Omega_{bk}$  – множество точек изображения, составляющие 10 % от общей площади изображения и которым соответствуют пиксели изображения с наибольшей по модулю яркостью. Со-

ответственно  $A(b_k)$  характеризует энергию «наилучшей» части изображения  $\Omega_{bk}$ . Для построения дерева решений рассчитываются показатели «компактности» исходного изображения и разложенного по  $m$  и по  $n$ :

$$A_l = A(b_k), \quad A_m = A(W_{Lm} b_k) + A(W_{Hm} b_k), \quad A_n = A(W_{Ln} b_k) + A(W_{Hn} b_k), \quad (2)$$

где через  $W_{Lm}, W_{Hm}, W_{Ln}, W_{Hn}$ , обозначены операторы взятия НЧ ( $L$ ) или ВЧ ( $H$ ) частей вейвлет-разложения по  $m$  или по  $n$ . Максимальное из трех значений  $A_l, A_m, A_n$  соответствует оптимальному выбору на дереве решений.

Коррекцию структурного шума на спутниковых изображениях предлагается проводить в два этапа. На первом этапе необходимо создать «оптимальное» дерево вейвлет-разложения. Для этого используется снимок с однородным сюжетом (калибровочный снимок), на котором содержится минимальное количество объектов. На втором этапе для всех поступающих со спутника видеоданных производится вейвлет-фильтрация.

На рисунке 2 показан пример калибровочного изображения, полученное при съемке в видимом диапазоне эталонного источника сигнала (слева-вверху, контраст усилен), результат его классического вейвлет-разложения (справа-вверху) и результат «оптимального» пакетного разложения (внизу). Можно видеть, что при «оптимальном» пакетном вейвлет-разложении изображение сведено к минимальному количеству ненулевых составляющих и шумовая составляющая изображения равномерно «раскидана» по вейвлет-компонентам.

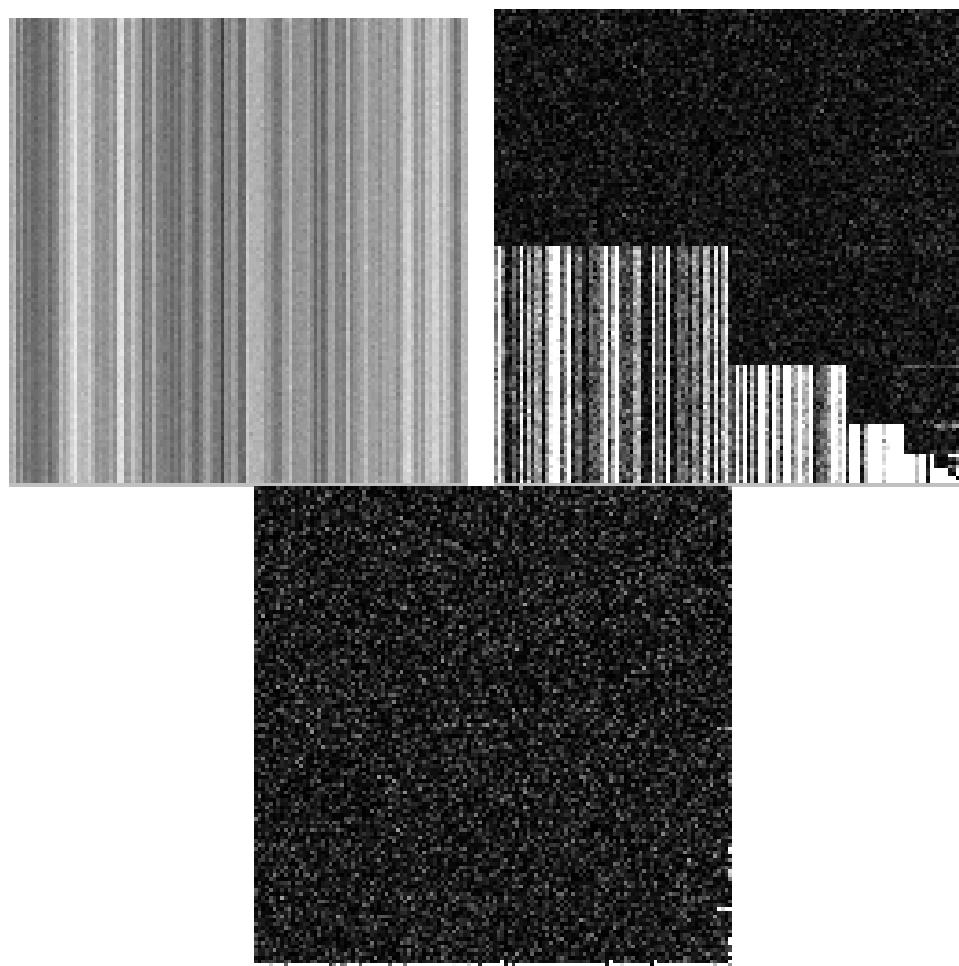


Рис. 2. Калибровочное изображение в видимом диапазоне спектра (слева-вверху),  
его классическое вейвлет-разложение (справа-вверху)  
и «оптимальное» пакетное разложение (внизу)

### Библиографический список

1. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 104 с.
2. Еремеев В.В., Зенин В.А. Модели коррекции динамических структурных искажений на космических изображениях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 33. С. 3-7.
3. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

## ШУМОПОДАВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДОБЕШИ

А.О. Попов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, andrey-popov03@mail.ru*

**Аннотация.** В работе рассматривается вейвлет-преобразование Добеши в задаче подавления шумов на изображениях. Реализованы алгоритмы прямого и обратного преобразования Добеши, алгоритм фильтрации вейвлет-коэффициентов и алгоритм оценки качества результата по разностному изображению.

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование, разложение Добеши, белый шум.

## IMAGE NOISE REDUCTION USING WAVELET DOBSHA TRANSFORMATIONS

А.О. Попов

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, andrey-popov03@mail.ru*

**The summary.** The paper considers the Daubeche wavelet transform in the problem of noise reduction in images. Algorithms for direct and reverse conversion of the Hash, a filter algorithm for wavelet coefficients, and an algorithm for evaluating the quality of the result from a difference image are implemented.

**Keywords:** wavelet transform, decomposition of the Daubeche, white noise.

Одной из главных проблем при получении изображений от систем ДЗЗ является наличие шумов и помех, которые могут возникать по разным причинам. Источниками их возникновения могут быть природные и техногенные факторы, сбои в системах ДЗЗ, влияние стороннего электромагнитного излучения и т.д. Для решения данной проблемы рассмотрим вейвлет-преобразование.

Вейвлет – математическая функция, позволяющая анализировать различные частотные компоненты исходного сигнала. В отличие от других преобразований, вейвлеты позволяют анализировать сигнал одновременно в частотной и временной областях [1]. Основная идея вейвлет преобразования заключается в разложении изображения на низкочастотные и высокочастотные составляющие. Низкочастотные компоненты передают общую информацию об изображении, а высокочастотные компоненты передают его резкие переходы, различные шумы и помехи. Существуют разновидности рассмотренного преобразования, такие как: биортогональное, Хаара, Добеши и т.д. В данной работе будем использовать вейвлет-преобразование Добеши.

Для вейвлет-разложения изображения на низкочастотные и высокочастотные компоненты используются два фильтра, которые характеризуются соответствующими матрицами  $H_n$  и  $G_n$ :

$$H_{n/2} = \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots \end{pmatrix} \text{ и } G_{n/2} = \begin{pmatrix} g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots \end{pmatrix},$$

$$h_0 = 0.6830127, h_1 = 1.1830127, h_2 = 0.3169873, h_3 = -0.1830127$$

$$g_0 = -h_3, g_1 = h_2, g_2 = -h_1, g_3 = h_0.$$

Преобразование для двумерного сигнала выполняется сначала по строкам, а затем полученный результат обрабатывается по столбцам.

Пусть  $A_{n \times n}$  – это исходное изображение,  $C_{11}$  – это его низкочастотная компонента,  $D_{11}, D_{12}, D_{13}$  – это высокочастотные компоненты, тогда разложение можно описать так:

$$C_{11} = H_{n/2} \cdot A \cdot H_{n/2}^T,$$

$$D_{11} = G_{n/2} \cdot A \cdot H_{n/2}^T, D_{12} = H_{n/2} \cdot A \cdot G_{n/2}^T, D_{13} = G_{n/2} \cdot A \cdot G_{n/2}^T.$$

Для восстановления изображения следует использовать обратное вейвлет-преобразование.

Программное обеспечение разработано на языке программирования C++ с использованием фреймворка QT для создания кроссплатформенного программного обеспечения [2]. Программа позволяет добавить случайный (белый) шум к bmp-изображению, выполнить прямое и обратное вейвлет преобразование и произвести его фильтрацию от помех.

На рисунке 1 представлено исходное изображение, результат его прямого и обратного вейвлет-преобразования второго уровня.

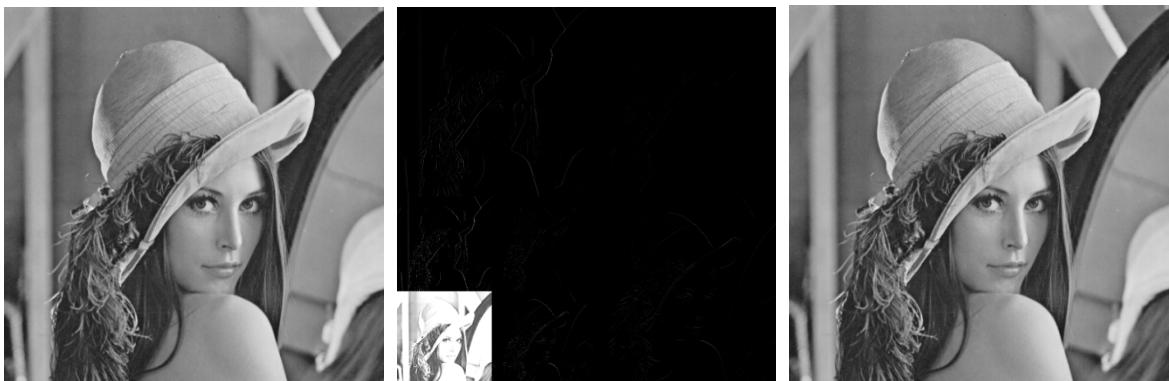


Рис. 1. Слева – исходное изображение, по центру – прямое вейвлет преобразование второго порядка, справа – восстановленное изображение

По нашему наблюдению в низкочастотной вейвлет-составляющей шумы остаются незначительно, поэтому предполагается окончательно подавить его медианной фильтрацией. Основная доля шумов переходит в высокочастотные вейвлет-компоненты. Здесь применяется пороговая фильтрация путем сравнения текущего пикселя с соседними. Если пиксель больше порога и хотя бы один окружающих его элементов равен нулю, то исследуемый пиксель обнуляется.

На рисунке 2 изображена высокочастотная вейвлет-компоненты с шумом и отфильтрованная компонента. На рисунке 3 приведен пример изображения с шумом и результат его фильтрации. Для оценки качества фильтрации используется разностное изображение между исходным эталонным снимком и обработанным (см. рис. 3).

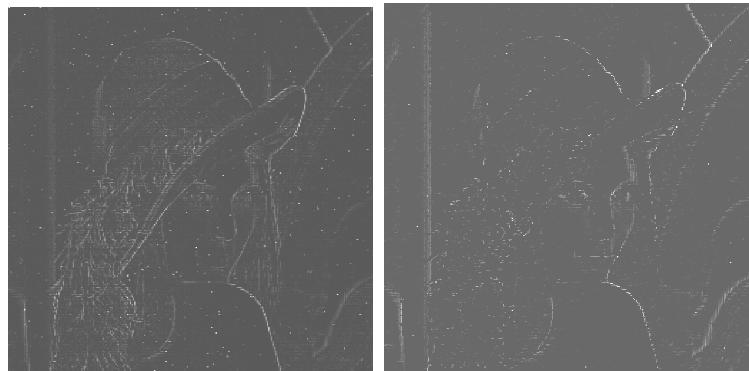


Рис. 2. Слева – высокочастотная вейвлет-компоненты с шумом, справа - отфильтрованная компонента



Рис. 3. Слева - изображение с шумом, по центру – результат фильтрации, справа - разностный снимок

Экспериментальные исследования показали, что качество фильтрации сильно зависит от заданного порога. Дальнейшим развитием предложенного подхода будет разработка алгоритма автоматического подбора порога в зависимости от характеристик изображения и априорно известных параметров шума.

#### Библиографический список

1. Теория и практика вейвлет-преобразования. ВОРОБЬЕВ В.И., ГРИБУ НИН В.Г. ВУС, 1999. С.1-204.
2. QT – Википедия [Электронный ресурс] / wikipedia. Режим доступа <https://ru.wikipedia.org/wiki/Qt>, свободный. (дата обращения: 15.01.2025).

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## ОБНАРУЖЕНИЕ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПОЛНОПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

**С.И. Гусев, Л.Л. Кузнецов, В.А. Ушенкин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kuznleo@gmail.com*

**Аннотация.** В работе рассматривается поляриметрическая классификация объектов на радиолокационных изображениях. Используется алгоритм поляриметрической классификации Клода-Потье для определения водной поверхности. Рассмотрена поляриметрическая декомпозиция Клода-Потье и классификатор Уишарта. Проведено сравнение результатов поляриметрической классификации с и без применения классификатора Уишарта.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), радиолокационные изображения (РЛИ), поляриметрическая классификация, классификация Клода-Потье, декомпозиция Клода-Потье, классификатор Уишарта.

## WATER SURFACE DETECTION ON QUADRO-POLARIMETRIC RADAR IMAGES

**S.I. Gusev, L.L. Kuznetsov, V.A. Ushenkin**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, kuznleo@gmail.com*

**Abstract.** The paper considers polarimetric classification of objects on radar images. The Claude-Pottier polarimetric classification algorithm is used to detect water surface. Claude-Pottier polarimetric decomposition and The Wishart classifier are considered. The results of polarimetric classification with and without Wishart classifier are compared.

**Keywords:** Earth remote sensing, radar images, polarimetric classification, Claude-Pottier classification, Claude-Pottier decomposition, Wishart classifier.

Радиолокационная съёмка является одним из широко используемых методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Основным её преимуществом над оптической съёмкой является независимость от времени суток и погодных условий (например, облачности). Однако, интерпретация получаемых радиолокационных изображений (РЛИ) является непростой задачей, требующей предварительной обработки полученных снимков, после которой формируется изображение в градациях серого, которое может содержать неоднозначности и различные искажения, затрудняющие его дешифрирование.

Классификация объектов на РЛИ – важная и до сих пор не решённая задача. В частности, большую практическую значимость имеет обнаружение водной поверхности, что позволяет обнаруживать паводки, определять береговую линию и т.д. Существуют различные алгоритмы классификации объектов, однако в данной работе мы будем использовать алгоритм на основе анализа поляриметрической информации.

В настоящее время радиолокационные изображения чаще всего получают с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА). Такие радиолокаторы могут использовать различные комбинации поляризаций сигнала при излучении и приёме (ГГ, ВВ, ГВ и ВГ, где Г – горизонтальная поляризация, В – вертикальная). В случае если РСА способен регистрировать все четыре набора поляризаций, то получаемое им РЛИ называется полнополяризованным [1]. При отражении от разных объектов поверхности поляризация излучённой электромагнитной волны (ЭМВ) изменяется по-разному, таким образом, принятая поляризованный ЭМВ содержит определённую физическую информацию об объектах поверхности. Анализ такой информации позволяет осуществить поляриметрическую классификацию объектов на РЛИ.

Существует несколько различных алгоритмов поляриметрической классификации, однако наилучшие результаты в настоящее время показывает классификация Клода-Потье

[2]. В её основе лежит одноимённая декомпозиция, которая базируется на трёх параметрах – энтропии  $H$ , анизотропии  $A$  и среднем угле рассеяния  $\bar{\alpha}$ .

Поляриметрическая энтропия по фон Нейману определяется как  $H = -\sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i$ . Если энтропия низкая ( $H < 0,3$ ), то отражатель можно считать слабо деполяризующим и он может быть представлен в виде эквивалентного точечного объекта. Низкая энтропия обычно свойственна океану и умеренно шероховатым поверхностям (например, полям). При высокой энтропии ( $H > 0,7$ ) отражатель является сильно деполяризующим, и его необходимо рассматривать как площадной объект. Леса обычно характеризуются высокой энтропией.

Поляриметрическая анизотропия  $A$  дополняет энтропию, но учитывать её следует только при высокой энтропии, что позволяет отличить различные объекты с одинаковой энтропией. Низкая анизотропия обычно относится к лесам и океанам, а средняя и высокая – к городской застройке.

Средний угол рассеяния  $\bar{\alpha}$  близок к нулю для океанов и имеет средние или высокие значения (45–90°) в лесах и городах.

С помощью декомпозиции  $H/A/\bar{\alpha}$  можно произвести неконтролируемую классификацию объектов на полнополяризационном изображении. Для этого плоскость  $H/\bar{\alpha}$  разделяется на девять зон в соответствии с поляриметрическими классами объектов (Рис. 1) [3]. Светло-серым цветом обозначена недоступная зона.

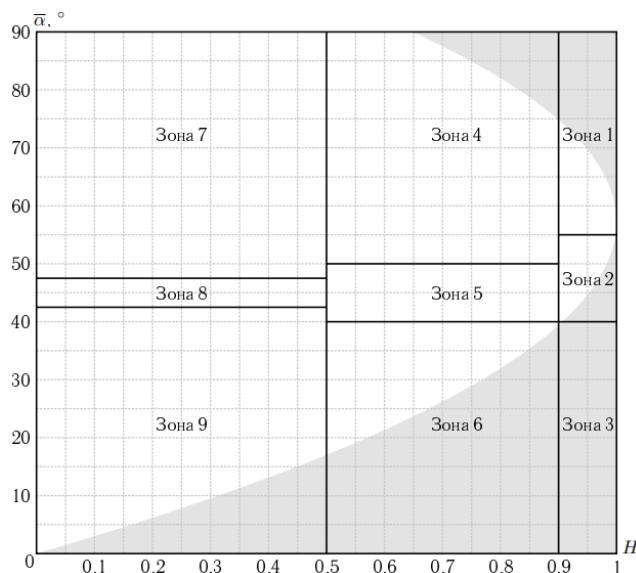


Рис. 1. Границы зон, в соответствии с которыми производится классификация

В зону 1 попадает множественное отражение от двугранных уголковых отражателей с высокой энтропией. Ко второй зоне относится объемное рассеяние сигнала растительностью с высокой энтропией. Третья зона подразумевает отражение от поверхности с высокой энтропией, однако она полностью расположена в недоступной зоне, что означает, что такое отражение не встречается. Зона 4 содержит множественное отражение от двуглавых уголковых отражателей со средней энтропией. В пятую зону попадает отражение сигнала растительностью со средней энтропией. К шестой зоне относят отражение от поверхности со средней энтропией. В седьмую зону классифицируют отражение от двугранного уголкового отражателя с низкой энтропией. В восьмую зону распределяют отражение от диполя, а в девятую – отражение от гладкой поверхности с низкой энтропией.

Поскольку целью данной работы является обнаружение водной поверхности, главный интерес представляют зоны 6 и 9. Согласно Клоду и Потье, в шестую зону попадают шеро-

ховатые поверхности, в частности, вода с сильным волнением, а в девятую зону – вода со слабым волнением и морской лёд.

Произведем поляриметрическую классификацию Клода-Потье над РЛИ, соответствующим региону, представленному на рисунке 2. Результат такой классификации можно увидеть на рисунке 3.

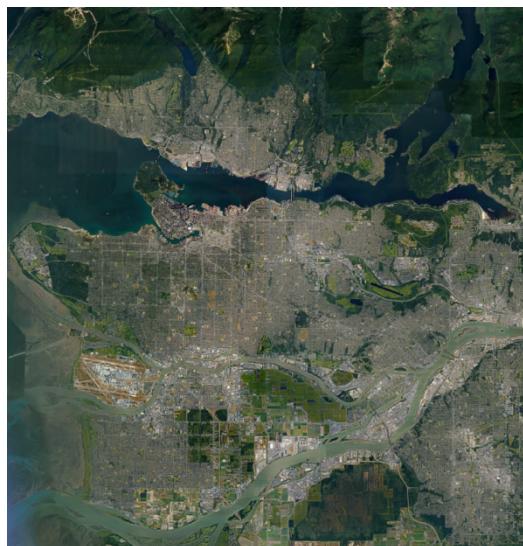


Рис. 2. Спутниковое изображение местности, представленной на используемом РЛИ

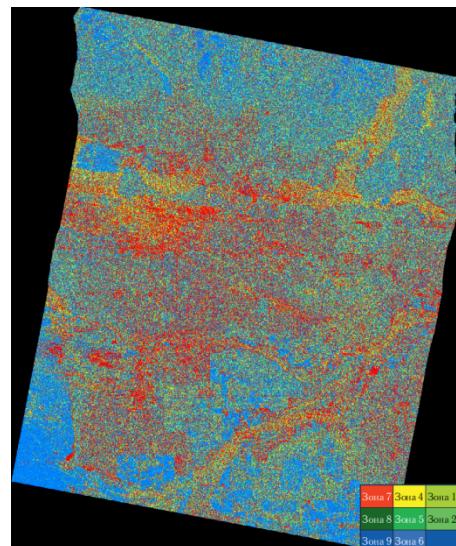


Рис. 3. Ортотрансформированное изображение, содержащее результат неконтролируемой поляриметрической классификации Клода-Потье

Результаты классификации в таком виде не позволяют правильно определить водную поверхность – изображение сильно зашумлено, так как многие пиксели были ошибочно классифицированы. Для получения лучшего результата следует произвести итерационную переклассификацию объектов на основе меры сходства по Уишарту вида

$$d_W(T, i) = \ln|T_{\text{эт } i}| + \text{tr}(T_{\text{эт } i}^{-1} T),$$

где  $T_{\text{эт } i}$  – эталонное значение поляризационной матрицы когерентности объектов  $i$ -го класса. Данный метод с обучением является некоторой адаптацией алгоритма  $k$ -средних для поляриметрической классификации.

Результат классификации с использованием меры сходства по Уишарту приведен на рисунке 4.

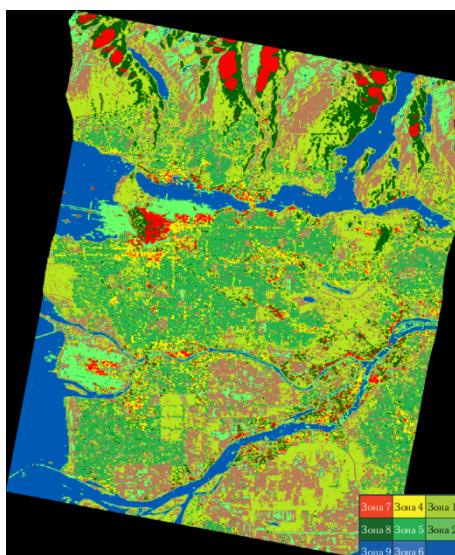


Рис. 4. Результат классификации с использованием меры сходства по Уишарту

При использовании классификатора Уишарта водная поверхность была классифицирована с достаточно высокой точностью. Следует отметить, что некоторая ее часть ошибочно отнесена к зоне 2, однако такие ошибки допустимы, поскольку не существует алгоритма, близкого к идеальному.

Таким образом, можно сделать вывод, что алгоритм поляриметрической классификации Клода-Потье с использованием классификатора Уишарта можно эффективно использовать для определения водной поверхности на радиолокационных изображениях.

### **Библиографический список**

1. Синёва А.А. Поляризационная радиолокация для обнаружения и идентификации пленочных загрязнений моря. Труды МФТИ – Том 6, №3 – 2014.
2. Lee J.S., Pottier E. Polarimetric Radar Imaging: from Basic to Applications. 2009
3. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. 2018

УДК 520.68; ГРНТИ 47.13.07

## **МНОГОМАТРИЧНЫЕ МУЛЬТИВЕКТОРНЫЕ МАНЕВРОВЫЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**В.А. Линьков, С.Ю. Линькова**

Rязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, linkov.v.a@rsreu.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются варианты конструкций многоматричных мультивекторных двигательных систем с перестраиваемой многослойной компоновкой, предназначенные для использования в качестве маневровых двигателей при развертывании и свертывании малоразмерных космических аппаратов и рулонных гибких солнечных батарей.

**Ключевые слова:** мультивекторный многоматричный двигатель, бинарный космический аппарат, цифровая двигательная ячейка.

## **MULTI-MATRIX MULTI-VECTOR MANEUVERING PROPULSION SYSTEMS FOR SMALL-SIZED SPACECRAFTS**

**V.A. Linkov, S.Yu. Linkova**

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, linkov.v.a@rsreu.ru

**Abstract.** The paper considers design options for multi-matrix multi-vector propulsion systems with a reconfigurable multi-layer layout, intended for use as maneuvering engines during deployment and folding of small-sized spacecraft and roll-up flexible solar panels.

**Keywords:** multi-vector multi-matrix engine, binary spacecraft, digital propulsion cell.

Разработанные устройства относятся к классу многоматричных мультивекторных двигательных систем (ММДС) с цифровым управлением [1 - 8, 36, 37, 40 - 45] для малоразмерных космических аппаратов (МКА) и предназначены для использования в качестве маневрового двигателя с мультивекторной тягой при выполнении операций коррекции траектории полета, ориентации, развертывания и свертывания гибких рулонных солнечных батарей бинарных космических аппаратов (БКА) [9 – 35, 38, 39]. При разработке к ним предъявлялись следующие требования: высокая скорость разворота БКА с прецизионной точностью (цифровое мультивекторное управление величиной и направлением тяги), компактность, заправка твердым топливом в процессе изготовления, технологичность изготовления [37].

Техническим результатом является возможность целенаправленной перестройки конфигурации ММДС, состоящей из более двух вложенных мультивекторных двигательных

матриц с программируемыми тяговыми и энергетическими характеристиками двигательных ячеек.

Используемые сокращения: «МТД-подложка» - это аббревиатура словосочетания монолитная термостойкая диэлектрическая подложка. Под используемым в тексте словосочетанием «двигательная ячейка» понимается следующее: двигательная ячейка – это группа F элементов  $a_r(i, j)$  двигательной матрицы  $m \times n$  с элементами которой находятся на пересечении строки  $m$  с группой столбцов  $n$  (количество которых равно количеству разрядов управляющего двоичного кода) и состоят из набора коммутируемых разнокалиберных зарядов (элементов)  $F = \{a_1w_1(i, j+1), a_2w_2(i, j+2), a_3w_4(i, j+3), a_4w_8(i, j+4), a_5w_{16}(i, j+5)\}$  твердого топлива в пропорциях 1-2-4-8-16 где:  $a_r$ - элемент двигательной ячейки,  $r$  – номер ячейки ( $r = 1, 2, \dots, N$ );  $w_k$  – весовой коэффициент величины тяги элемента реверсивной двигательной ячейки с распределением величин в виде последовательных степеней числа два ( $k = 1, 2, 4, 8, 16, \dots, (1 \cdot 2^h)$ ), ( $h$  – максимальное количество разрядов управляющего двоичного кода). Каждому элементу двигательной ячейки в зависимости от объема (массы) размещенного твердого топлива (после его воспламенения) соответствует определенный весовой коэффициент  $w_k$  величины тяги. В зависимости от управляющего кода, соответствующему определенному двоичному числу, происходит изменение величины тяги двигательной ячейки в интервале от 0 до 100% за счет суммирования выбранных двоичным кодом сочетаний дискретных величин тяг двигательных элементов.

Известны однослойные ММДС [1 - 8] недостаток которых заключается в малом количестве двигательных ячеек  $a$ , следовательно, и ограниченном количестве запаса твердого топлива. В отличие от них многослойные ММДС, в зависимости от количества слоев, имеют в разы больший запас твердого топлива. Их компоновка может базироваться, например, на принципе бутона цветка розы [40 - 43], где полуцилиндрические подложки в виде лепестков выкладывают один за другим при сборке и отделяются в космосе в обратной последовательности по мере их использования. Другим способом компактного размещения может быть построение на основе принципа русской матрешки [44 - 45], где цилиндрообразные подложки с разным диаметром последовательно вкладываются одна в другую. На рисунке 1 приводятся в собранном виде два типа многоматричных мультивекторных маневровых двигательных систем (МММДС) с полуцилиндрическими МТД-подложками для коррекции простых траекторий [43] и ММДС, состоящих из полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек для выполнения сложных скоростных маневров с кувырками во время движения в сочетании с разнонаправленным вращением относительно центра масс МКА [42]. На рисунке 2 показана последовательность сборки МММДС на Земле и последовательность отделения полуцилиндрических и полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек в космосе по мере расхода твердого топлива.

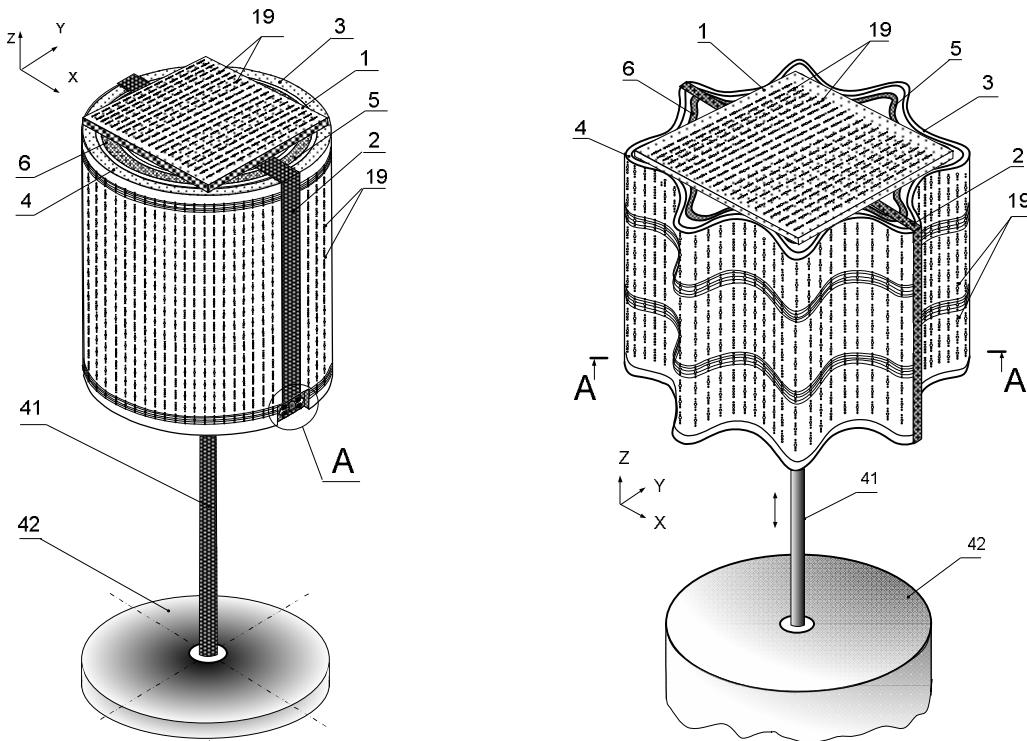


Рис. 1. Цилиндрообразная и цилиндрическая с волнообразным внешним контуром многослойные многоматричные мультивекторные маневровые двигательные системы для малоразмерных космических аппаратов в собранном состоянии.

Функционирование устройств входящих в класс ММДС рассмотрим на примере работы мультивекторной многоматричной маневровой двигательной системы МММДС для малоразмерных космических аппаратов с цилиндрическим волнообразным внешним контуром (рис. 1 - рис. 4) которая содержит плоскую квадратную подложку с размещенной матричной структурой двигательных ячеек 1,стыковочную панель 2, первую 3 и вторую 4 полуцилиндрические с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложки большего радиуса, третью 5 и четвертую 6 полуцилиндрические с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложки, пятую 7 и шестую 8 полуцилиндрические с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложки меньшего радиуса, седьмую 9 и восьмую 10 полуцилиндрические с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложки наименьшего радиуса, направляющие сквозные отверстия 11, выходные планарные микроразъемы 12, входные планарные микроразъемы 13, фиксирующие отверстия с внутренней канавкой 14, стопорные шайбы 15, стягивающие стержни с легкоплавкими перемычками посередине и утолщенными конусными торцами 16, торообразные пиротехнические микрозаряды 17, отталкивающие винтовые пружины сжатия 18, двигательные ячейки 19 состоящие из ранжированных по объему конусообразных микропор 20 – 24 (рис. 3) заполненных твердым топливом в пропорциях последовательных степеней числа два (1-2-4-8-16), первую термостойкую мембрану 25, вторую термостойкую мембрану 26 образующую сопла 27, сферические воспламенители 28, шины выборки воспламенителей по столбцам 29, шина выборки воспламенителя по строке 30, контроллер 31, блок памяти отработанных кодовых комбинаций 32, блок памяти альтернативных кодовых комбинаций 33, дешифратор данных 34, дешифратор строк 35, дешифратор столбцов 36, коммутатор двигательных ячеек 37, коммутатор выборки двигательных матриц 38, формирователь адресов активируемых воспламенителей двигательной ячейки 39, коммутатор отделения отработанных двигательных матриц 40, на рисунке 1 (МММДС в собранном виде) также приведена отводящая МММДС от корпуса БКА телескопическая штанга 41 и

элемент корпуса БКА 42. Количество формирователей адресов активируемых воспламенителей двигательных ячеек 39 равно суммарному количеству матричных двигательных структур, размещенных на полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложках 3-10. Для стягивания симметричных пар полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек (3 и 4, 5 и 6, 7 и 8, 9 и 10) используется по четыре стягивающих стержня с легкоплавкими перемычками посередине и утолщенными конусными торцами 16, пропущенные через торообразные пиротехнические микрозаряды 17, расположенные в четырех направляющих сквозных отверстиях 11 стыковочной панели 2 (рис. 2, 3).

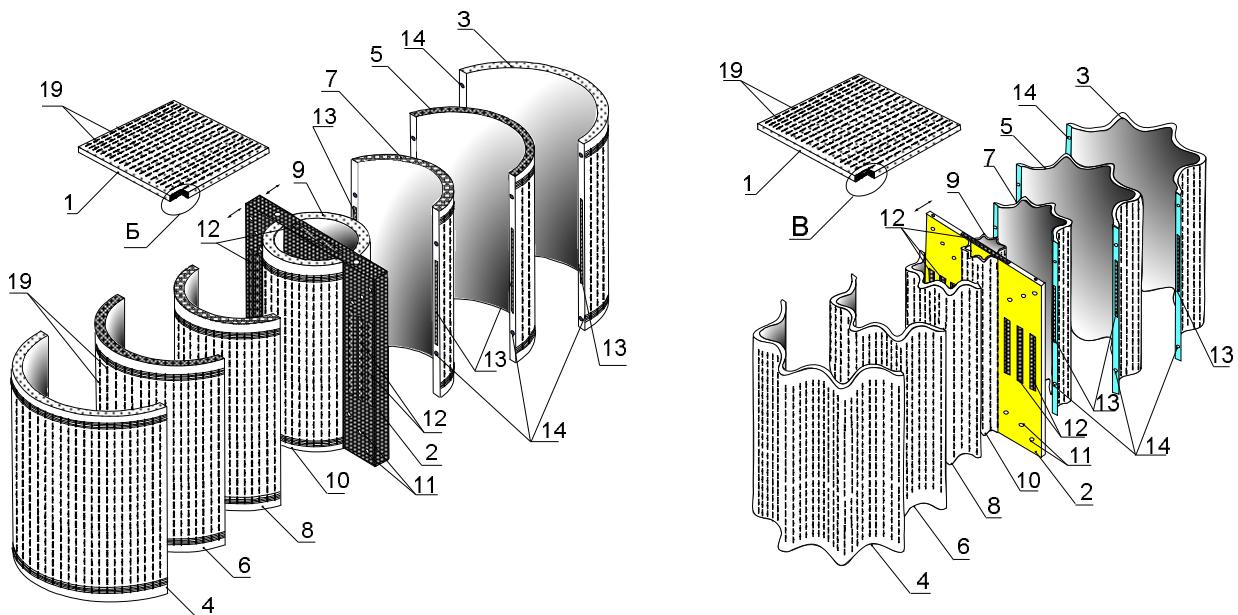


Рис. 2. Схемы последовательности сборки и обратная последовательность отделения элементов в космосе многоматричных мультивекторных маневровых двигательных систем в цилиндрообразном и цилиндрическом с волнообразным наружным контуром исполнения, для малоразмерных космических аппаратов.

Для осуществления реверсивного вращения, линейно-углового ускорения или торможения при изготовлении МТД-подложек, двигательные ячейки 19, состоящие из двигательных конусообразных микропор 20-24, размещаются с дискретным расположением веерообразных продольных осей и равным угловым шагом  $\psi$  ( $\psi = 180^\circ / n$ , где  $n = 10$  для приводимого примера) в каждой радиально-веерной группе (рис. 4), каждая из которых расположена в чередующихся сопряженных выпуклых и вогнутых поверхностях полуокружностей, определенных с угловым шагом  $\phi$  ( $\phi = 360^\circ / n$ , где  $n = 10$  для приводимого примера), образующих в совокупности пары симметричных разнокалиберных полуцилиндрических МТД-подложек с волнообразной поверхностью, соединенных при сборке и вложенных одна в другую (например, позиции 3 и 4; 5 и 6 рисунка 4) для формирования многослойной замкнутой трансформируемой цилиндрообразной с волнообразной поверхностью структуры [42].

В зависимости от установленного временного ресурса работы БКА, требований к точности и быстродействию двигательной системы на определенных участках траектории движения такие параметры как: количество разрядов цифрового управления, количество двигательных ячеек, соотношение величин объемов зарядов твердого топлива в двигательных ячейках и их энергоемкость могут отличаться в каждой двигательной матрице друг от друга в зависимости от целевого использования МММДС. Целевое использование также определяет выполнение разнотипных задач, максимальное количество требуемых дискретных рецептур смесей твердых топлив, применяемых для заправки двигательных ячеек в диапазоне от

флегматизированных твердых топлив (замедленного горения) до детонационных твердых топлив (импульсно-микровзрывного характера горения) [42].

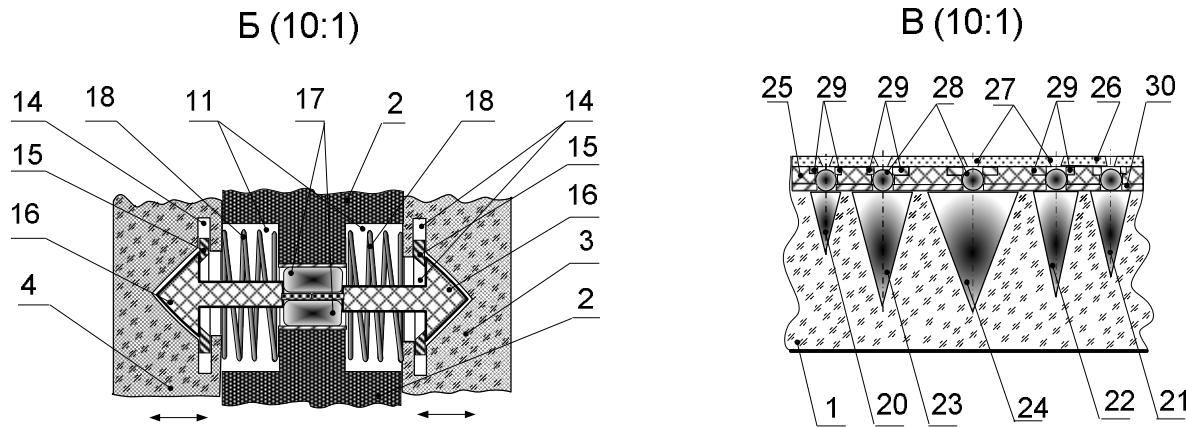


Рис. 3. Выносной элемент Б (10:1) в увеличенном масштабе и разрезе, поясняющий расположение элементов соединяющих торцы полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек со стыковочной панелью и выносной элемент В (10:1) в увеличенном масштабе и разрезе, поясняющий организацию двойичной структуры (1-2-4-8-16) распределения топливных зарядов в двигательной ячейке

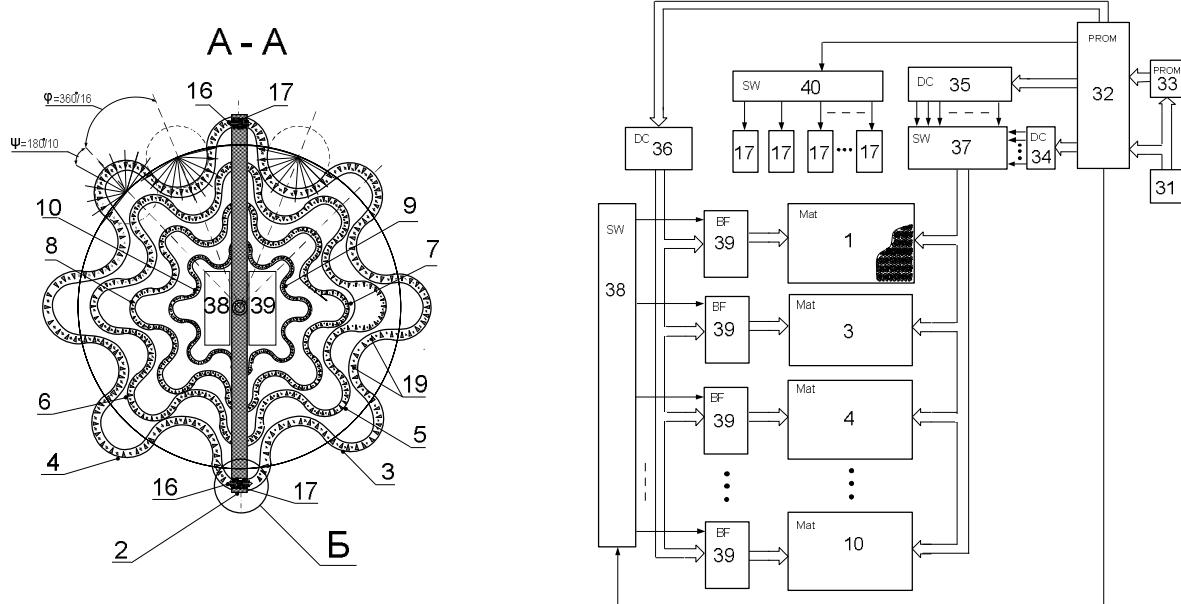


Рис. 4. Многоматричная мультивекторная маневровая двигательная система для малоразмерных космических аппаратов в разрезе по линии сечения А-А и структурная блок-схема многоматричных мультивекторных маневровых двигательных систем для малоразмерных космических аппаратов.

Устройство работает следующим образом: предварительно осуществляется программирование каждой используемой полуцилиндрической с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложки (3 - 10) с матричной структурой организации двигательных ячеек за счет введения в конусообразные нанопоры [33] или микропоры 20 - 24 зарядов твердого топлива с заданными энергетическими свойствами. Широкий диапазон энергетических характеристик используемых твердых или пастообразных топлив, в рецептуру которых входят наносферы металлов с разными энергетическими свойствами, например, алюминия (Al) или бериллия (Be), позволяет создать для осуществления программирования последовательный дискретный ряд топливных смесей, которыми заливаются разнокалиберные конусообразные микропоры 20 - 24 двигательных ячеек 19, расположенные на строго идентифицируемых по-

луцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложках двигательных матриц 3 – 10, в зависимости от целевого использования МММДС в космосе. По окончанию топливного программирования полуцилиндрические с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложки 3 - 10 последовательно, согласно идентификационного номера, устанавливаются в стыковочную панель 2 для формирования единого графика работы двигателяной системы, состоящего из совокупности графиков работы нескольких полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек, использующие для создания тяг твердые топлива с разными характеристиками.

Работа устройства начинается с подачи управляющего кодового слова с контроллера 31 (рис. 4), которое поступает на информационные входы блока памяти отработанных кодовых комбинаций 32 и блока памяти альтернативных кодовых комбинаций 33. Управляющее кодовое слово состоит из кода адреса строк и кода адреса столбцов, определяющих местоположение двигательной ячейки на поверхности полуцилиндрической с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложки, кода данных, определяющего в двоичном коде величину тяги каждой двигательной ячейки и идентифицирующего кода номера двигательной матрицы. Блок памяти отработанных кодовых комбинаций 32 запоминает коды всех отработанных сферических воспламенителей 28 с целью исключения попыток повторного включения отработанных двигательных элементов и, в случае появления повторной кодовой комбинации, выдает команду на блок памяти альтернативных кодовых комбинаций 33 на выдачу заранее смоделированных и введенных перед началом работы таблиц принятия оптимальных решений в конкретных ситуациях в виде множества наборов альтернативных целенаправленных кодовых комбинаций. С информационных выходов блока памяти альтернативных кодовых комбинаций 33, преобразованные кодовые комбинации через адресные шины строк, столбцов и шину данных одновременно поступают на входы дешифратора столбцов 36, дешифратора строк 35 и вход дешифратора данных 34, определяющего величину тяги двигательной ячейки. Коммутатор адресов двигательных ячеек 37 производит соединение группы шин строк с группой шин данных каждой двигательной ячейки, задавая кодовой комбинации определенный весовой коэффициент тяги в двоичном коде. Управляющий сигнал выборки двигательной матрицы с блока памяти альтернативных кодовых комбинаций 33 поступает на вход коммутатора выборки двигателевых матриц 38, который выдает сигнал на соответствующий формирователь адресов активируемых воспламенителей двигателевых ячеек 39, разрешающий прохождение через него кодовой комбинации с выхода дешифратора столбцов 36, которая воспламеняет сферические воспламенители 28 двигательных ячеек 19, расположенные на пересечении соответствующих шин строк и столбцов [42, 43].

При полном расходе твердого топлива всех двигательных ячеек, расположенных на внешних поверхностях первой 3 и второй 4 полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек, блоком отработанных кодовых комбинаций 32 выдается управляющий сигнал на вход коммутатора отделения отработанных матриц 40 на сброс использованных первой 3 и второй 4 полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек в космос. Управляющий электрический сигнал с выхода коммутатора отделения отработанных двигателевых матриц 40 вызывает воспламенение и детонацию торообразных пиротехнических микрозарядов 17 (рис. 3), которые плавят легкоплавкие перемычки посередине стягивающих стержней с конусными торцами 16 разрывая их пополам. В результате отталкивающие винтовые пружины сжатия 18 раздвигаются и отталкивают торцы первой 3 и второй 4 полуцилиндрических МТД-подложек в противоположные стороны, разрывая электрические соединения контактов входных 13 и выходных 12 планарных микроразъемов, что является подтверждением успешной расстыковки первой 3 и второй 4 полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек со стыковочной панелью 2 и началом активизации работы следующих двигательных ячеек, расположенных на третей 5 и четвертой 6 полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-

подложках и так далее (в данном примере - представленном на рисунке 2. до сброса седьмой 9 и восьмой 10 полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек) [43].

Предложенные конструкции многоматричных мультивекторных маневровых двигательных систем для малоразмерных космических аппаратов позволяют увеличить количество двигательных ячеек без увеличения наружного диаметра за счет многослойной компоновки вложенных полуцилиндрических с волнообразной наружной поверхностью МТД-подложек, на которых размещены двигательные матрицы, осуществить перестройку тяговых и энергетических характеристик в широком диапазоне в зависимости от целевого использования МММДС при ограниченных весогабаритных возможностях малоразмерных космических аппаратов, что ранее невозможно было осуществить известными двигательными системами, с изменяемым вектором тяги, работающими на твердом топливе.

### Библиографический список

1. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2660210 C1, 05.07.2018. Заявка № 2017114832 от 26.04.2017. / Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.
2. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2654782 C1, 22.05.2018. Заявка № 2017123451 от 03.07.2017. / Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.
3. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178924 U1, 23.04.2018. Заявка № 2017116244 от 10.05.2017. / Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.
4. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178748 U1, 18.04.2018. Заявка № 2017123920 от 05.07.2017. / Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.
5. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 183937 U1, 09.10.2018. Заявка № 2018125136 от 09.07.2018. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.
6. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2700299 C1, 16.09.2019. Заявка № 2018124424 от 03.07.2018 / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.
7. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2707474 C1, 26.11.2019. Заявка № 2018142754 от 03.12.2018. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.
8. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 189442 U1, 22.05.2019. Заявка № 2018143940 от 11.12.2018. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.
9. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой сканирующей антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2745166 C1, 22.03.2021. Заявка № 2020122810 от 03.07.2020. / Линьков В.А.
10. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой сканирующей антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 203113 U1, 22.03.2021. Заявка № 2020123633 от 09.07.2020. / Линьков В.А.
11. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2744261 C1, 04.03.2021. Заявка № 2020121447 от 23.06.2020. / Линьков В.А.

12. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2735448 C1, 02.11.2020. Заявка № 2020113745 от 03.04.2020. / Линьков В.А.

13. Бинарный космический аппарат со сканирующей антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2735449 C1, 02.11.2020. Заявка № 2020116045 от 27.04.2020. / Линьков В.А.

14. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 200445 U1, 26.10.2020. Заявка № 2020122662 от 03.07.2020. / Линьков В.А.

15. Бинарный космический аппарат со сканирующей антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями Патент на полезную модель RU 200213 U1, 13.10.2020. Заявка № 2020117163 от 12.05.2020. / Линьков В.А.

16. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 198984 U1, 06.08.2020. Заявка № 2020116038 от 27.04.2020. / Линьков В.А.

17. Бинарный малоразмерный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой развертываемой ленточной солнечной батареей: Патент на изобретение RU 2716728 C1, 16.03.2020. Заявка № 2019103169 от 05.02.2019. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

18. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой ленточной солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2714064 C1, 11.02.2020. Заявка № 2019111570 от 16.04.2019. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

19. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение RU 2761686 C1, 13.12.2021. Заявка № 2021110352 от 13.04.2021. / Линьков В. А.

20. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2761486 C1, 08.12.2021. Заявка № 2021111499 от 21.04.2021. / Линьков В. А.

21. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных излучающих нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 207630 U1, 08.11.2021. Заявка № 2021119904 от 06.07.2021. / Линьков В. А.

22. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 206424 U1, 13.09.2021. Заявка № 2021112468 от 27.04.2021. / Линьков В. А.

23. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 206426, 13.09.2021. Заявка № 2021111489 от 21.04.2021. / Линьков В. А.

24. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение 2749431 C1, 10.06.2021. Заявка № 2020135104 от 26.10.2020. / Линьков В. А.

25. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение RU 2744277 C1, 04.03.2021. Заявка № 2020134827 от 22.10.2020. / Линьков В.А.

26. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 202750 U1, 04.03.2021. Заявка № 2020136043 от 02.11.2020. / Линьков В.А.

27. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 202757 U1, 04.03.2021. Заявка № 2020135116 от 26.10.2020. / Линьков В.А.

28. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных излучающих нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2772290 C1, 18.05.2022. Заявка № 2021118434 от 23.06.2021. / Линьков В. А.

29. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 211253 U1, 26.05.2022. Заявка № 2021102985 от 07.02.2022. / Линьков В. А.

30. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 211363 U1, 01.06.2022. Заявка № 202101987 от 27.01.2022. / Линьков В. А.

31. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776623 C1, 22.07.2022. Заявка № 2022101616 от 24.01.2022. / Линьков В. А.
32. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776624 C1, 22.07.2022. Заявка № 2022101989 от 27.01.2022. / Линьков В. А.
33. Линьков В.А. Наноразмерные допуски и посадки для коллоидной самосборки микропрограммных элементов с конвейерным программированием спектров излучения на базе квантовых точек и апконвертирующих наночастиц структуры ядро-оболочка. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2020: сб.тр. III междунар. науч.-техн. Форума в 10 т. Т.6 - Рязань: РГРТУ-2020 С. 161-172.
34. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ПОИСКОВЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ВНЕЗЕМНЫХ НАНООБЪЕКТОВ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ
- В сборнике: Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Под редакцией О.В. Миловзорова. Рязань, 2022. С. 22-28.
35. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОИСКОВЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ВНЕЗЕМНЫХ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ НАНООБЪЕКТОВ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ. В книге: Новые информационные технологии в научных исследованиях Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2022. С. 148-149.
36. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ЦИФРОВЫЕ МАТРИЧНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023: сб. тр. VI междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2023. С. 81-88.
37. Линьков В.А., Линькова С.Ю. МУЛЬТИВЕКТОРНЫЕ МАТРИЧНЫЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БИНАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023: сб. тр. VI междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2023. С. 89-97.
38. Линьков В.А., Линькова С.Ю. БИНАРНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОИСКА И СБОРА ВНЕЗЕМНЫХ КРИОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАНООБЪЕКТОВ С МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛАГРАНЖА ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ. В сборнике: Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. Рязань, 2023. С.159-172.
39. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ПОИСК ИЗЛУЧАЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СИНТЕЗА ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НАНООБЪЕКТОВ, ЗАПУСКАЮЩИХ МЕХАНИЗМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2024: сб. тр. VII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2024. С. 70-77.
40. Многоматричная мультивекторная двигательная система для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 223962 U1, 11.03.2024. Заявка № 2023131702 от 28.11.2023. / Линьков В.А.
41. Мультивекторная многоматричная двигательная система для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 224770 U1, 03.04.2024. Заявка № 2023133191 от 08.12.2023. / Линьков В.А.
42. Мультивекторная многоматричная двигательная система для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2823589 C1, 24.07.2024. Заявка № 2023131701 от 28.11.2023. / Линьков В.А.
43. Многоматричная мультивекторная двигательная система для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2820486 C1, 04.06.2024. Заявка № 2018143940 от 20.11.2023. / Линьков В.А.
44. Многоматричная мультивекторная реконфигурируемая двигательная система для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 230321 U1, 26.11.2024. Заявка № 2024120448 от 16.07.2024. / Линьков В.А.
45. Мультивекторная многоматричная реконфигурируемая двигательная система для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 231432 U1, 28.01.2025. Заявка № 2024121462 от 24.07.2014. / Линьков В.А.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ОТ ДАТЧИКОВ СКАНОВОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

С.Д. Антонушкина, П.А. Князьков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, foton@rsreu.ru*

**Аннотация.** В работе рассматривается задача определения дефектов оптических изображений дистанционного зондирования Земли от датчиков сканового принципа. Анализируется возможность автоматической идентификации таких дефектов и выполнена разработка соответствующего алгоритма. Приводятся результаты экспериментальных исследований, иллюстрирующие признаки определения дефектов разработанным алгоритмом.

**Ключевые слова:** оптическое изображение, дефекты изображений, автоматическая обработка, скановое изображение.

## ALGORITHM FOR AUTOMATIC DEFECTS DETECTION IN OPTICAL IMAGES OF REMOTE SENSING OF THE EARTH FROM PUSHBROOM SENSORS

S.D. Antonushkina, P.A. Knyazkov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, foton@rsreu.ru*

**Abstract.** The paper considers the problem of determining defects in optical images of remote sensing of the Earth from sensors of the scan principle. The possibility of automatic identification of such defects is analyzed and the corresponding algorithm is developed. The results of experimental studies illustrating the signs of defects in the developed algorithm are presented.

**Keywords:** radar optical image, image defects, automatic processing, pushbroom sensor image.

Развитие технологий обработки и распространения оптических изображений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на современном этапе предполагает разделение данных по стандартным уровням обработки и повышение автоматизации процедур их получения. Потоки принятой со спутника информации обычно распаковываются до уровня обработки L0, которые далее помещаются в хранилище или обрабатываются до более высоких уровней L1, L2 для последующей передачи потребителю [1]. Конкретные сценарии обработки, хранения и распространение данных ДЗЗ зависят как от назначения космической системы, так и от потребителя информации (рис. 1).

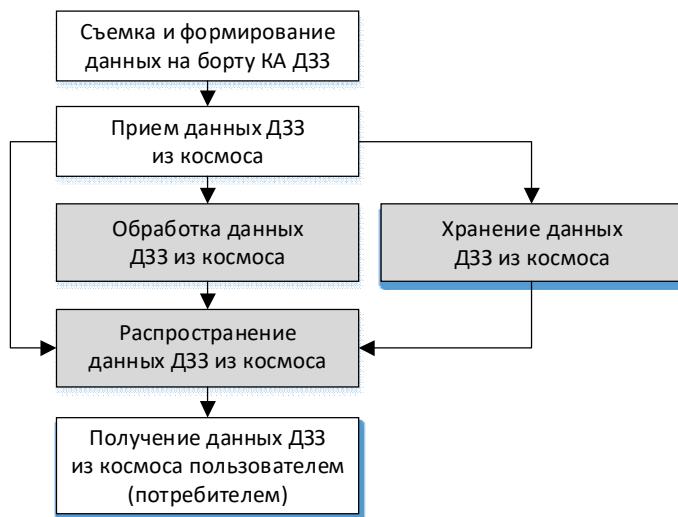


Рис. 1. Схема получения данных ДЗЗ потребителем

На рисунке 1 серым цветом показаны блоки, в которых необходимо знать информацию о наличии дефектов на изображении. На основании информации о дефектах изображения можно делать вывод о приемлемости полученных данных для обработки, хранения и передачи потребителю или целесообразности повторного сброса потока данных или проведения повторной съемки при возможности таких сценариев.

При возрастании объемов поступающей информации ДЗЗ, повышении требований к скорости их обработки и необходимости снижения стоимости эксплуатации космических систем нет альтернативы развития технологий автоматической обработки, хранения и распространения информации. В связи с этим возникает актуальная задача разработки алгоритмов автоматического обнаружения дефектов изображений, с применением которых возможно построение полностью автоматических технологий обработки, хранения и распространения космической информации. Использование автоматических алгоритмов оценки качества изображения с точки зрения обнаружения дефектов предполагает их применение с автоматическим обнаружением и формированием итоговой классификации дефектов (если такие имеются) без интерактивного контроля. Привлечение экспертов в этом случае необходимо только для настройки параметров алгоритмов под вид анализируемой информации.

Согласно [2] под артефактом понимается дефект или особенность данных дистанционного зондирования Земли из космоса, которые искажают их радиометрические, пространственно-частотные и координатно-измерительные характеристики.

### **Формирование изображений в датчиках сканового принципа действия**

При разработке алгоритма автоматического обнаружения дефектов изображений от целевой аппаратуры космических систем ДЗЗ сканового принципа действия рассмотрим принцип формирования такого изображения, который хорошо описан в литературе [3, 4]. В таких системах строка изображения создается за счет опроса строки матрицы ПЗС, а строки создаются движением изображения в фокальной плоскости за счет движения спутника по орбите. Для увеличения полосы захвата таких систем в фокальной плоскости устанавливаются с перекрытием несколько ПЗС-матриц в направлении поперек движения космического аппарата по орбите. Таким образом, формируемые изображения представляют собой сканы от разных ПЗС-матриц. Модель такого изображения, полученного от 4-х ПЗС-матриц, приведена на рисунке 2. Расположение темных участков на изображении, которые по ширине соответствуют размеру ПЗС-матриц, отражают разнесение положения ПЗС-матриц в фокальной плоскости и при таком размещении содержат рядом одноименные объекты на границе соседних сканов. Первые столбцы изображения также могут содержать служебную информацию. Примерами скановых изображений сформированными таким образом являются, например, маршруты съемки, получаемые от отечественных космических аппаратов «Аист-2Д» и «Ресурс-П». Это также является основной схемой съемки существующих и перспективных зарубежных космических аппаратов, которая позволяет увеличить полосу захвата съемки [4].



Рис. 2. Модель изображения ДЗЗ от датчика сканового принципа действия

## Дефекты изображений от целевой аппаратуры сканового принципа действия

Приведем согласно [2] примеры некоторых дефектов оптических изображений, построим гистограммы сканов изображения маршрута съемки для таких дефектов и определим их признаки. Гистограмма изображения с уровнями яркости в диапазоне  $[0; B_{\max}]$ , где  $B_{\max} = 2^{Nbit} - 1$ ,  $Nbit$  – разрядность изображения, определяется как дискретная функция  $H(b) = n_b$ , где  $b$  – уровень яркости изображения, а  $n_b$  – число пикселей изображения, имеющих яркость  $b$ . Для представления гистограммы в нормированном виде плотности вероятности на графиках далее значения  $n_b$  поделены на количество элементов гистограммы.

Для оценки дефектов определим уровни яркости  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  на гистограмме, такие что  $0 \leq B_0 < B_1 < B_2 < B_3 \leq B_{\max}$ . Уровень  $B_0$  – допустимый фоновый уровень яркости изображения, которым заполняется смещение сканов изображения. В самом распространённом случае значение этого уровня равно 0. Уровень  $B_3$  – уровень насыщения сигнала яркости изображения. Значение яркости изображения равное или превышающее этот уровень будет приниматься за блюминг. В самом распространённом случае значения этого уровня равно  $B_{\max}$ . Уровни яркости  $B_1$  и  $B_2$  задаются для определения дефектов экспозиции изображения.

Разделим гистограмму на диапазоны яркости  $[0; B_0]$ ,  $(B_0; B_1)$ ,  $[B_1; B_2]$ ,  $(B_2; B_3)$ ,  $[B_3; B_{\max}]$ . На основе нахождения яркости элементов сканов изображения в определенных зонах гистограммы построим индикаторы наличия или отсутствия того или иного дефекта.

### 1. Полная потеря информации

Признаком полной потери информации изображения маршрута съемки является вид гистограммы целого изображения  $H_{\Sigma}(b)$ , все значения которой находятся в диапазоне яркости  $[0; B_0]$ . Таким образом, признак дефекта полной потери информации  $D_1$  определяется на основе условия

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \sum_{b=B_0+1}^{B_{\max}} H_{\Sigma}(b) < N_P, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $N_P$  – допустимое количество сбойных элементов изображения.

Допустимое количество сбойных элементов изображения  $N_P$  вводится в критерии для построения автоматического алгоритма с целью исключения срабатывания признаков на единичных сбоях в элементах изображения. Настраиваемый уровень допустимых сбойных элементов изображения целесообразно связать с вероятностью сбоя  $N_P = M \cdot N \cdot P_D$ , где  $M$  – число строк изображения маршрута съемки,  $N$  – число столбцов изображения маршрута съемки,  $P_D$  – допустимая вероятность сбоя элемента изображения.

Пример изображения с дефектом полной потери информации и его гистограмма представлены на рисунке 3.

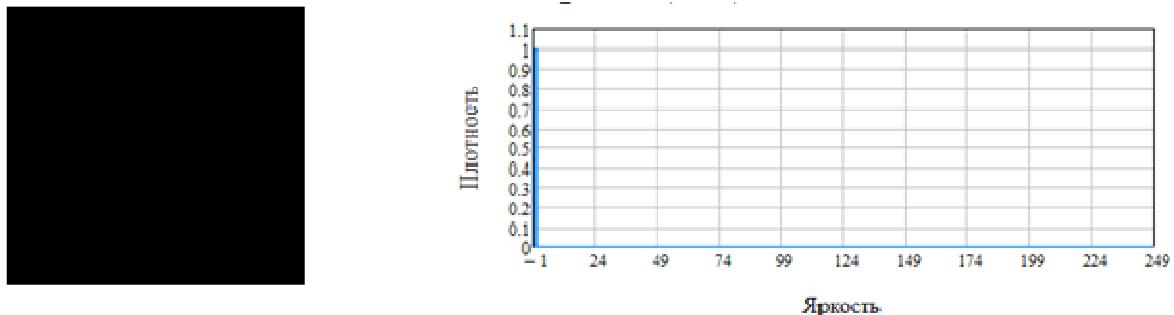


Рис. 3. Изображение с дефектом полной потери информации (слева) и его гистограмма с признаком дефекта  $D_1$  (справа)

### 2. Потеря ПЗС-матриц

Признаком полной потери информации ПЗС-матрицы является вид гистограммы сбойной матрицы  $H_i(b)$ ,  $i = \overline{1, I}$ , где  $I$  – число матриц изображения маршрута съемки, все значения которой находятся в диапазоне яркости  $[0; B_0]$ . Таким образом, признак дефекта полной потери информации  $D_2$  для каждой матрицы определяется на основе условия

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \sum_{b=B_0+1}^{B_{\max}} H_i(b) < N_P/I, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Пример изображения с дефектом потери информации ПЗС-матрицы и гистограммы его матриц представлены на рисунке 4.

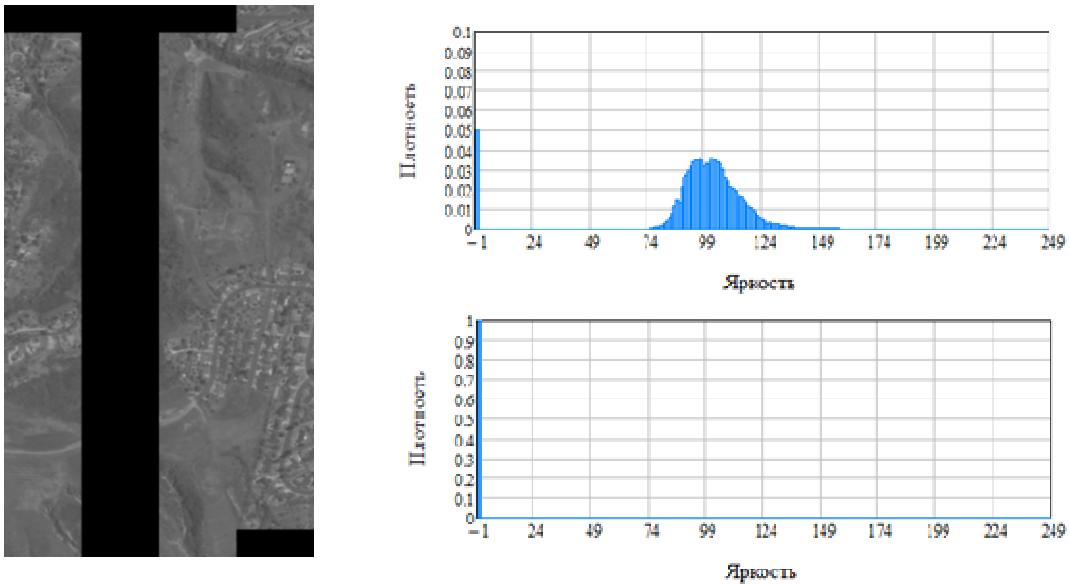


Рис. 4. Изображение с дефектом потери информации ПЗС-матрицы (слева), вид гистограмм 1, 3, и 4 ПЗС-матриц (справа сверху), гистограмма 2-й ПЗС-матрицы с признаком дефекта  $D_2$  (справа снизу)

### 3. Частичная потеря информации ПЗС-матриц

Признаком частичной потери информации ПЗС-матрицы является вид гистограммы сбойной матрицы  $H_i(b)$ ,  $i = \overline{1, I}$ , плотность вероятности которой завышена в диапазоне яркости  $[0; B_0]$ . Таким образом, признак дефекта частичной потери информации  $D_3$  для каждой матрицы определяется на основе условия

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \sum_{b=0}^{B_0} H_i(b) - M_S N_M > N_P / I, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $M_S$  и  $N_M$  – строчный сдвиг сканов друг относительно друга и количество столбцов в скане, определяющие допустимое количество фоновых элементов изображения в скане.

Пример изображения с дефектом частичной потери информации ПЗС-матрицы и гистограммы его матриц представлены на рисунке 5.

#### 4. Недоэкспозиция

Признаком недоэкспозиции является вид гистограммы целого изображения  $H_\Sigma(b)$ , в котором максимум и медиана гистограммы находятся в диапазоне яркости меньше  $B_1$ . Таким образом, признак дефекта недоэкспозиции  $D_4$  определяется на основе условия

$$D_4 = \begin{cases} 1, & N_{\max} < B_1 \wedge N_{med} < B_1, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $N_{\max}$  и  $N_{med}$  – аргументы максимума и медианы гистограммы, определяемые как

$$N_{\max} = \arg \max_b \left( H_\Sigma(b), b = \overline{B_0 + 1, B_3 - 1} \right),$$

$$N_{med} = \arg \text{med}_b \left( H_\Sigma(b), b = \overline{B_0 + 1, B_3 - 1} \right).$$

Пример изображения с дефектом недоэкспозиции и его гистограмма представлены на рисунке 6.

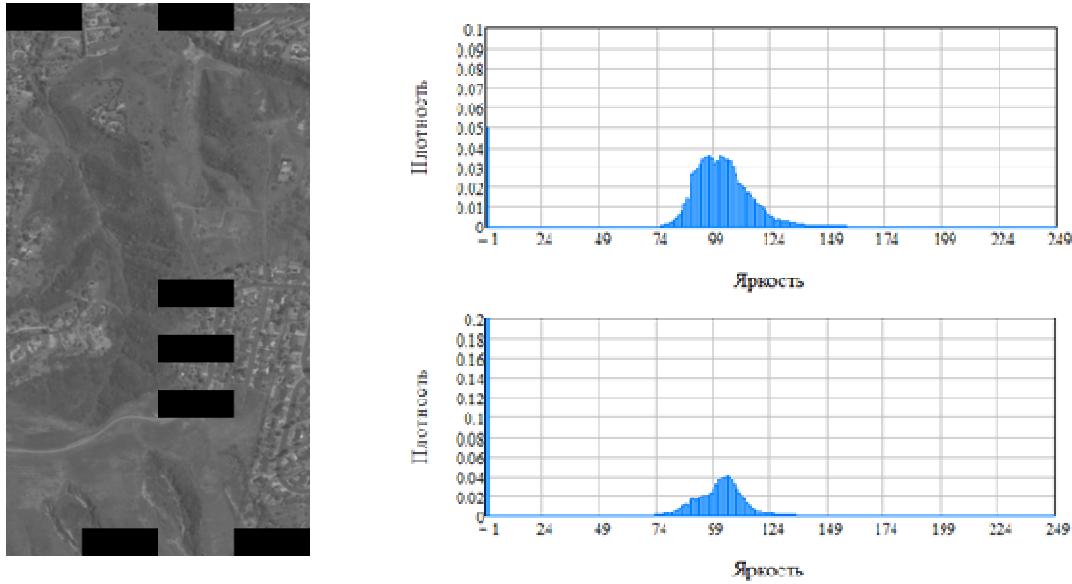


Рис. 5. Изображение с дефектом частичной потери информации ПЗС-матрицы (слева), вид гистограмм 1, 2, и 4 ПЗС-матриц (справа сверху), гистограмма 3-й ПЗС-матрицы с признаком дефекта  $D_3$  (справа снизу)

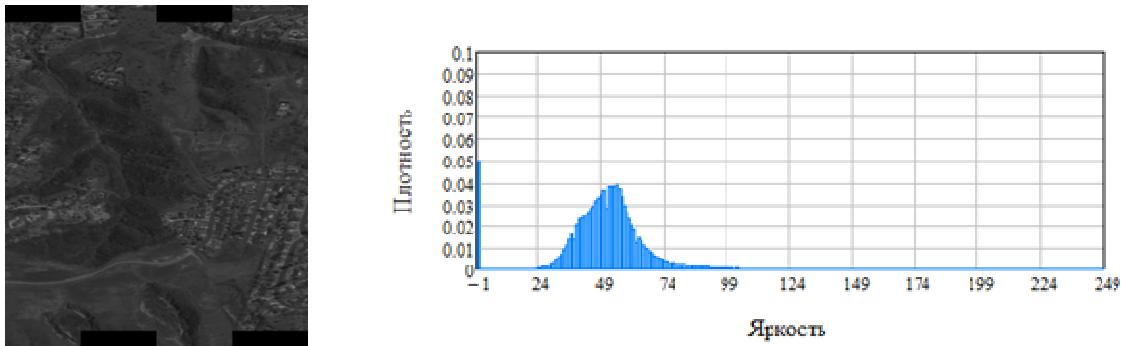


Рис. 6. Изображение с дефектом недоэкспозиции (слева), вид гистограммы с признаком дефекта  $D_4$  (справа)

Применение одновременно двух критериев используется для повышения надежности оценки правильности экспозиции при большой яркостной неоднородности наблюдаемых сцен, приводящих к получению широких несимметричных или полимодальных по форме гистограмм.

##### 5. Переэкспозиция

Признаком переэкспозиции является вид гистограммы целого изображения  $H_{\Sigma}(b)$ , в котором максимум и медиана находятся в диапазоне яркости больше  $B_2$ . Таким образом, признак дефекта переэкспозиции  $D_5$  определяется на основе условия

$$D_5 = \begin{cases} 1, & N_{\max} > B_2 \wedge N_{med} > B_2, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Пример изображения с дефектом переэкспозиции и его гистограмма представлены на рисунке 7.

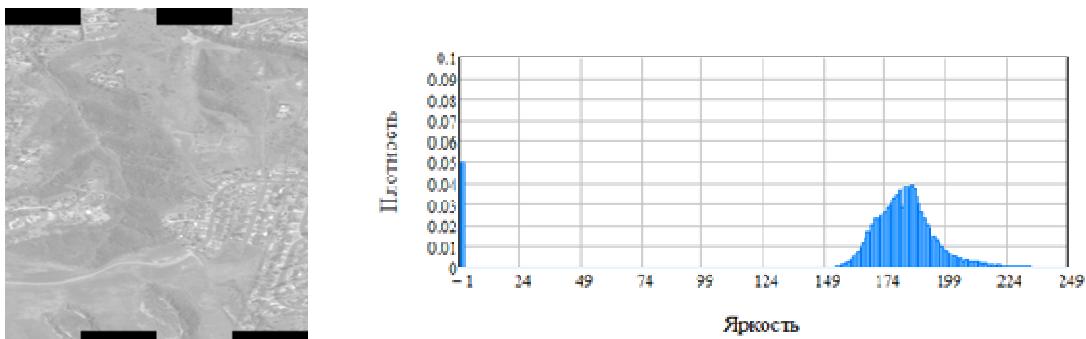


Рис. 7. Изображение с дефектом переэкспозиции (слева), вид гистограммы с признаком дефекта  $D_5$  (справа)

##### 6. Блюминг

Признаком блюминга является вид объединенной гистограммы матриц маршрута съемки  $H_{\Sigma}(b)$ , в котором в зоне яркости  $[B_3; B_{\max}]$  присутствуют значения или присутствуют больше допустимого количества. Таким образом, признак дефекта блюминга  $D_6$  определяется на основе условия

$$D_6 = \begin{cases} 1, & \sum_{b=B_3}^{B_{\max}} H_{\Sigma}(b) > N_P, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Пример изображения с дефектом блюминга и фрагмент его гистограммы представлены на рисунке 8.

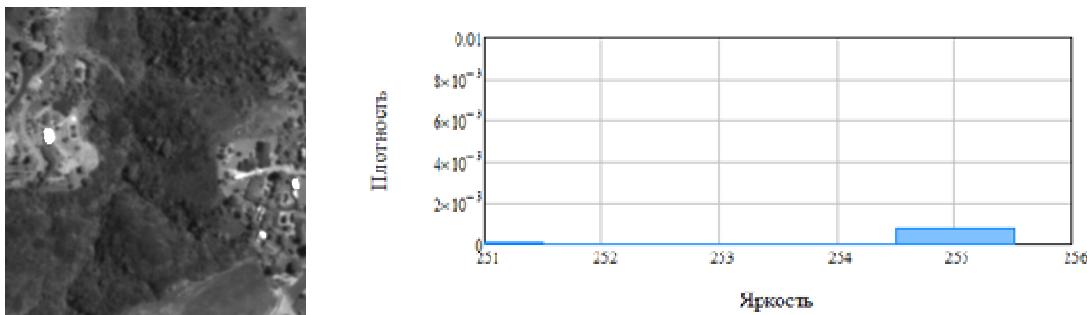


Рис. 8. Фрагмент изображения маршрута съемки с дефектом блюминга (слева), вид фрагмента гистограммы с признаком дефекта  $D_6$  (справа)

### Алгоритм автоматического определения дефектов

Алгоритм автоматического определения дефектов сканового изображения на основе введенных признаков дефектов изображения состоит из следующих основных шагов.

Шаг 1. Получение настроек алгоритма под формат анализируемых данных.

Шаг 2. Разбиение изображения на зоны сканов, построение гистограмм яркости для каждого скана и целого изображения.

Шаг 3. Присвоение (при наличии) признаков дефектов отдельным сканам изображения и целому изображению.

Шаг 4. Передача признаков дефектов изображения в согласованных форматах.

Блок-схема этого алгоритма показана на рисунке 9.

После анализа изображения передача признаков дефектов может выполняться в вызывающую процедуру, базу данных или записываться в файл метаданных для маршрута съемки. Сохранение такой информации предотвращает возможную многократную оценку изображений, что также является актуальным вопросом при больших объемах информации от современных систем ДЗЗ.

### Выводы

В настоящей работе выполнена разработка алгоритма автоматического определения дефектов оптических изображений ДЗЗ сформированными датчиками сканового принципа действия на основе введения признаков дефектов для гистограмм сканов и гистограммы целого изображения.

Алгоритм позволяет осуществлять автоматический контроль изображений маршрутов съемки с обнаружением следующих дефектов:

- полная потеря информации;
- потеря ПЗС-матриц;
- частичная потеря информации ПЗС-матриц;
- недоэкспозиция;
- переэкспозиция;
- блюминг.

Данный алгоритм является экономичной по ресурсам, поскольку для анализа изображения маршрута съемки требуется однократное чтение изображения для построения гистограмм сканов. Процедуры формирования гистограммы целого изображения по гистограммам сканов и определения признаков дефектов по гистограммам не являются трудоемкими. Предполагается использовать реализацию данного алгоритма для обеспечения процедур обработки, хранения, и распространения данных ДЗЗ, работающих в автоматическом режиме.

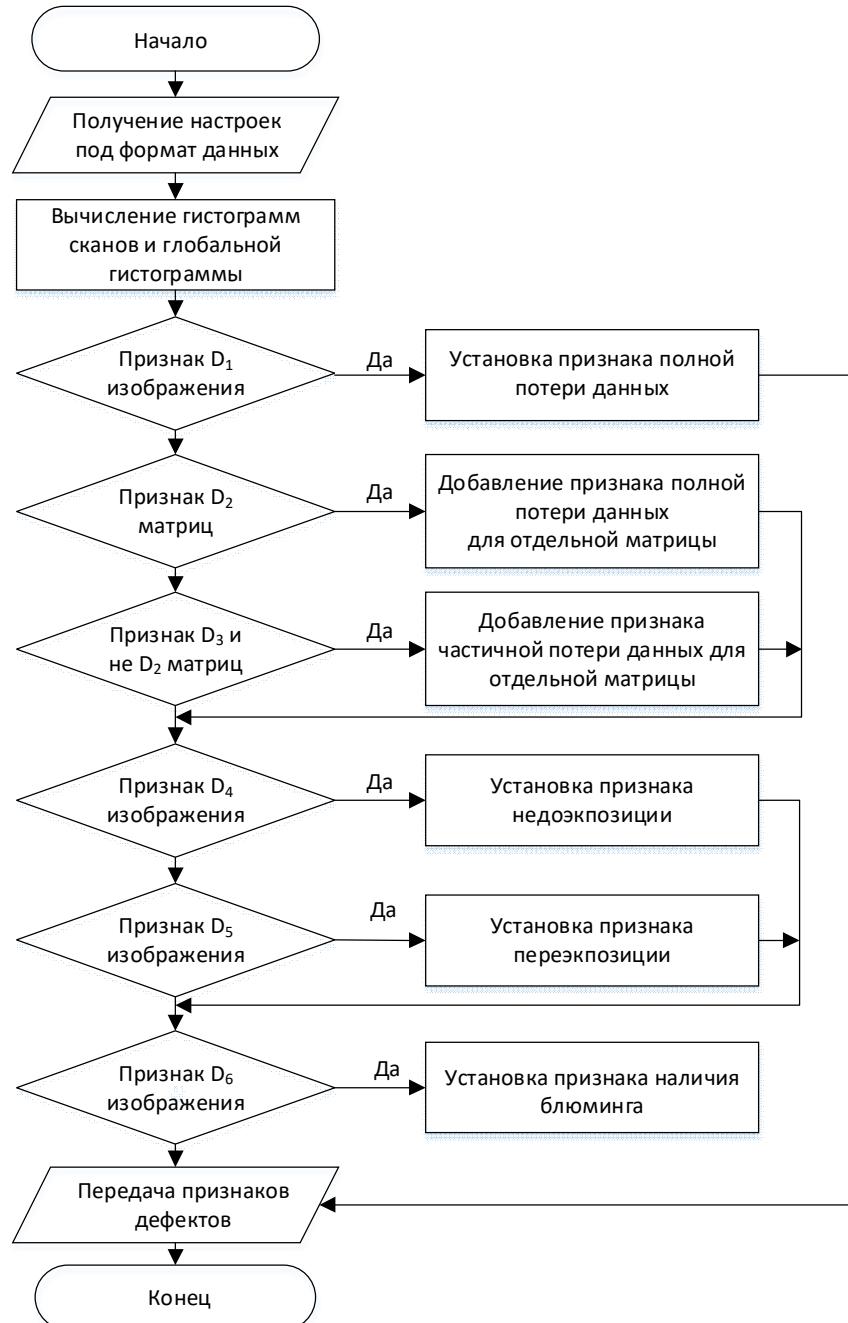


Рис. 9. Блок-схема алгоритма автоматического определения дефектов изображения на основе введенных признаков

### Библиографический список

- ГОСТ Р 59480-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Уровни обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса: введ. впервые : дата введения 2021-06-04. — Москва : Стандартинформ, 2021. — 12 с.
- ГОСТ Р 70778-2023. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Типовые артефакты оптических данных: введ. впервые : дата введения 2023-10-16. — Москва : Российский институт стандартизации, 2023. — 20 с.
- Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. Монография.— Под ред. В.В. Еремеева. — М.: Физматлит, 2015. — 460 с. — ISBN 978-5-9221-1596-4.
- Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.

УДК 004.921; ГРНТИ 20.19.29

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ТЕКСТУРИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ЗЕМНОГО ЭЛЛИПСОИДА ДАННЫМИ ДЗЗ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ OPENGL

Т.А. Осипова, Н.А. Райков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, foton@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема эффективного текстурирования трехмерной модели Земного эллипсоида данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием технологии OpenGL. Рассматриваются способы множественного текстурирования, которые позволяют накладывать спутниковые изображения на фон картографической основы без потери качества и с учетом географической привязки. Проанализированы три основных подхода к решению задачи: объединение нескольких текстур в одну, создание искривленных поверхностей для наложения текстур и ограниченное текстурное наложение.

**Ключевые слова:** данные дистанционного зондирования Земли, текстурирование, компьютерная графика, OpenGL.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF TEXTURING THREE-DIMENSIONAL EARTH ELLIPSOID BY REMOTE SENSING DATA USING OPENGL TECHNOLOGY

T.A. Osipova, N.A. Raikov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, foton@yandex.ru

**Abstract.** The paper considers the problem of effective texturing of a three-dimensional model of the Earth ellipsoid by Earth remote sensing (ERS) data using OpenGL technology. The methods of multiple texturing are considered, they allow overlaying satellite images on the background of the cartographic base with no quality loss and with consideration of geographical reference. Three main approaches to the problem are analyzed: combining multiple textures into one, creating curved surfaces for texture mapping, and limited texture mapping.

**Keywords:** remote sensing data, texturing, computer graphics, OpenGL.

С ростом объёмов данных, получаемых от современных систем дистанционного зондирования Земли, возникает потребность в разработке эффективных методов их обработки и наглядного представления. Визуализация спутниковых изображений на трёхмерной модели Земного эллипсоида находит применение таких задачах ДЗЗ как отбор материалов съёмки из каталогов, ретроспективный анализ архивных данных, экологический мониторинг и пр.

Одной из основных технологий для 3D-визуализации является OpenGL – спецификация, определяющая платформонезависимый программный интерфейс для написания приложений, использующих двумерную и трёхмерную компьютерную графику. В данной статье проводится сравнительный анализ различных способов текстурирования технологии OpenGL, включая способы множественного текстурирования, трёхмерных объектов на примере Земного эллипсоида.

### Компоненты OpenGL

К основным компонентам технологии относятся буферы, текстуры, шейдеры, сцена и камера.

Буферы – объекты памяти для хранения обрабатываемых данных. OpenGL поддерживает несколько различных типов буферов [1]: буфер вершин (Vertex Buffer Object, VBO) хранит данные о вершинах, включая их атрибуты (координаты, нормали, цвета вершин, текстурные координаты и т.д.); буфер индексов (Element Buffer Object, EBO) хранит индексы вершин для оптимизации рендеринга; буфер цвета (Color Buffer) хранит итоговые цвета на уровне отдельных пикселей для отображения на экране; буфер глубины (Depth Buffer) ис-

пользуется для определения видимости объектов (z-буферизация); буфер трафарета (Stencil Buffer) позволяет создавать сложные эффекты – отражения, тени и пр.

Некоторые буфера, используемые для управления процессом рендеринга, объединяются в набор, называемый буфер кадра (FrameBuffer) – в него, в частности, входят буфера цвета, глубины и трафарета.

Текстуры (текстурные карты) – это изображения, которые накладываются на поверхность объектов. Самым распространенным, но не единственным, типом текстуры является двумерная текстура, представляющая собой двумерный массив пикселей (изображение). Наложение текстуры на объект представляет собой процесс, называемый текстурированием. Этот процесс состоит из нескольких основных этапов [1].

1. Создание объекта текстуры и загрузка в него данных текстуры.

2. Задание текстурных координат для вершин объекта. Каждой вершине геометрического объекта назначаются текстурные координаты в диапазоне от 0 до 1. Координата (0,0) соответствует нижнему левому углу текстуры, координата (1,1) – верхнему правому. Эти координаты указывают, какая часть текстуры должна быть применена к данной вершине.

3. Передача текстуры во фрагментный шейдер.

4. Вычисление и получение значения фрагментов текстуры с помощью шейдера.

Шейдеры – это программы, написанные на C-подобном языке GLSL (OpenGL Shading Language), которые выполняются на GPU. Основные используемые шейдеры [2]:

- вершинный шейдер (Vertex Shader) обрабатывает вершины;

- геометрический шейдер (Geometry Shader) позволяет создавать новые геометрические объекты на основе существующих;

- фрагментный шейдер (Fragment Shader) обрабатывает пиксели.

Сцена – это виртуальное пространство, содержащее все объекты, которые нужно отобразить. Она включает в себя объекты (модели, примитивы); источники света; материалы и текстуры, которые определяют внешний вид объектов; трансформации (позиция, масштаб, поворот объектов).

Камера – это виртуальная точка зрения, с которой наблюдается сцена. Она определяется позицией, направлением взгляда, ориентацией и проекцией.

### Конвейерная архитектура OpenGL

OpenGL работает по принципу конвейера рендеринга (rendering pipeline). Конвейер представляет собой последовательность стадий обработки данных, преобразующих исходные данные (вершины, геометрические примитивы и текстуры) в финальное изображение. Этот процесс включает несколько ключевых этапов, которые показаны на рисунке 1.



Рис. 1. Конвейерная архитектура OpenGL

Основные этапы конвейера описаны далее.

### 1. Передача данных в OpenGL

Перед началом обработки данные помещаются в необходимые буферы, после чего, с помощью команд отрисовки, запускается конвейер OpenGL. Вершина рассматривается как набор значений, обычно включающие координаты положения и дополнительные данные для определения конечного цвета пикселей.

2. Шейдерная обработка вершин – вычисление положения координат вершин в пространстве сцены с использованием матриц трансформации, расчёт её цвета с учётом освещения и прочего [1].

3. Тесселяция – необязательный этап, позволяющий увеличивать детализацию объектов сцены – несколько вершин объекта описываются гладкой поверхностью высокого порядка, которая разбивается на необходимое число вершин. Этот этап состоит из двух ступеней конвейера:

- а) шейдер контроля – определяет уровень детализации поверхности [2];
- б) шейдер оценки – вычисляет положение и атрибуты новых вершин [2].

4. Геометрическая обработка – необязательный этап, на котором выполняется дополнительная обработка индивидуальных геометрических примитивов, включая их создание или модификацию (например, перемещение и вращение вершин).

5. Сборка примитивов – организация вершин в соответствующие геометрические примитивы (точки, линии или треугольники) [1].

6. Отсечение (обрезка) частей примитивов, чьи вершины находятся вне области видимости (части сцены, выводимой на монитор).

7. Растеризация – определение позиций на экране, покрываемых конкретным примитивом и интерполяция значений исходных данных (например, цветов).

8. Фрагментная обработка – определение конечного цвета фрагмента с использованием текстуры, освещения и других техник. Он также может изменять значение глубины фрагмента или полностью отменять его обработку через механизм "отбрасывания фрагментов" (fragment discard).

9. Постфрагментные операции – дополнительная обработка фрагментов, включая проверку видимости с помощью теста глубины (depth testing) и теста трафарета (stencil testing). Если фрагмент успешно проходит все включённые тесты, его цвет записывается в буфер кадра, либо, если включено смешивание (blending), комбинируется с текущим цветом пикселя.

Обособлено от конвейера рендеринга стоит обработка пиксельных данных, обычно получаемых из файлов изображений или создаваемых непосредственно в OpenGL. Эти данные часто хранятся в текстурах и доступны для использования всем ступеням конвейера. Чаще всего текстуры используются в операции текстурирования при фрагментной обработке.

## Способы наложения текстур на 3D-объекты

При визуализации данных ДЗЗ большое значение имеет возможность отображения нескольких аэрокосмических изображений на Земном эллипсоиде на фоне друг друга и/или на фоне картографической основы. То есть актуальной является задача множественного текстурирования.

Данную задачу в OpenGL можно решить разными способами, которые обобщённо можно объединить в три группы.

1. Объединение нескольких текстур в одну и наложение её на исходный объект.
2. Создание поверх исходного объекта других поверхностей с наложением на них соответствующих текстур.
3. Ограниченнное текстурное наложение.

К первой группе относятся мультитекстурирование и обновление части текстуры.

Для **мультитекстурирования** используются фрагментные шейдеры, которые объединяют текстуры на основе заданных параметров [1]. Например, можно использовать альфа-канал для управления прозрачностью одной текстуры относительно другой или выполнять другие действия по смешиванию или изменению цветов, если это необходимо. Также вместо реализации фрагментного шейдера возможно использование специальных функций `glBlendFunc` и `glBlendFunci`. Стоит отметить, что для корректного расположения спутникового снимка на поверхности Земли (на заданных координатах, с соответствующим поворотом относительно меридианов и параллелей, и т.д.) потребуется дополнять исходное изображение пикселями с необходимой прозрачностью, а также выполнять аффинные преобразования над изображением. Кроме того, для корректного масштабирования спутникового снимка необходимо ограничить область его наложения. Это можно сделать с помощью фрагментного шейдера.

**Обновление части текстуры** реализуется с помощью функции `glTexSubImage2D`, благодаря которой можно загрузить новое изображение по заданным координатам внутри исходной текстуры. При этом способе можно накладывать изображения непосредственно на картографическую основу. Однако, при таком способе итоговое разрешение наложенного изображения может значительно ухудшиться, т.к. функция `glTexSubImage2D` заменяет пиксели одной текстуры на пиксели другой и, следовательно, разрешение замещаемого участка картографической основы и разрешение вставляемого изображения должны совпадать. Таким образом, для корректного соотношения размеров изображения и размеров Земли, придется значительно уменьшать размер спутникового снимка (порой до ширины и высоты в нескольких пикселях, если разрешение картографической основы не очень высокое, а изображение покрывает малую площадь Земли). А это, в свою очередь, ведет к значительным потерям информации.

Ко второй группе можно отнести способ создания искривлённых поверхностей и отсечения лишних частей объектов.

**Искривлённые поверхности** представляют собой вручную созданные триангуляционные плоскости, на которые наносится текстура. Так как эти плоскости создаются вручную, поверхность может быть очень сложной формы. Способ искривлённых поверхностей позволяет визуализировать данные любой степени детализации, однако в этом случае необходимо учитывать количество и размер треугольников, составляющих поверхность: при большом количестве треугольников возрастает нагрузка на видеокарту, а при их малом количестве теряется точность определения координат точек текстуры, так как полученная поверхность может быть далека от эллипсоида.

Суть способа **отсечения лишних частей** состоит в формировании примитивного геометрического объекта (например, шара), нанесении на него текстуры и отсечении части объекта с помощью функции `glClipPlane` или фрагментного шейдера таким образом, чтобы на экране была визуализирована только необходимая часть объекта. Однако, для управления размерами и областью наложения накладываемой на объект текстуры требуется задавать поверхность вручную, что сводит этот способ к способу создания искривленной поверхности, который был рассмотрен выше.

**Ограниченнное текстурное наложение** – накладываемая текстура помещается на ограниченную область объекта с помощью специально созданного шейдера. На этапе фрагментной обработки для каждой точки области видимости определяется отображаемая текстура, лежащая поверх остальных (или любая другая) и визуализируется точка именно этой текстуры. Стоит отметить, что реализация этого способа требует осуществлять пересчет текстурных координат накладываемого изображения для корректного отображения всего изображения внутри заданной области.

Для апробации указанных способов было создано программное обеспечение, реализующее некоторые из перечисленных выше вариантов множественного наложения текстур.

### **Создание искривленных поверхностей**

Генерация поверхности для отображения текстуры спутникового изображения была осуществлена по следующему алгоритму [3].

1. Расчет промежуточных точек поверхности в геодезических координатах на основе 4 угловых точек аэрокосмического снимка. Предполагается, что геодезические координаты угловых точек накладываемого изображения известны, в данной работе для этого были использованы изображения с геодезической привязкой на основе RPC (Rational Polynomial Coefficients). С помощью этой привязки были вычислены координаты угловых точек. Далее изображение было поделено на равные прямоугольные ячейки, как показано на рисунке 2. При этом чем больше размеры изображения, тем больше должно быть ячеек. Углы ячеек были приняты за промежуточные точки.

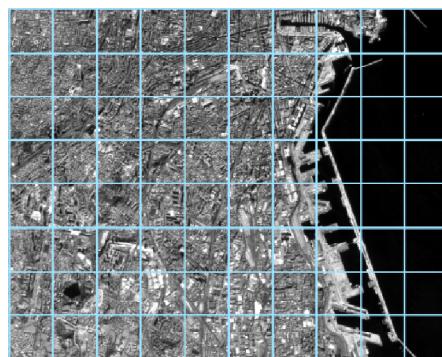


Рис. 2. Разделение изображения на равные прямоугольные ячейки

2. Осуществление преобразования геодезических координат промежуточных точек в пространственные (X, Y, Z) по следующим формулам:

$$X = (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L$$

$$Y = (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L ,$$

$$Z = [(1 - e^2) \cdot N + H] \cdot \sin B$$

где В – широта, L – долгота, Н – высота над поверхностью, N – радиус кривизны первого вертикала эллипсоида, е – эксцентриситет.

3. Задание вершин примитивов, определяющих поверхность, на основе пространственных координат промежуточных точек. В качестве примитивов были выбраны треугольники, полученные путем деления каждой прямоугольной ячейки пополам.

4. Задание текстурных координат для вершин примитивов.

В результате была сгенерирована поверхность, отображающая аэрокосмический снимок в его исходном разрешении. Однако при вращении и масштабировании сцены появляются артефакты, заключающиеся в том, что созданная поверхность «тонет» в объекте эллипсоида. Для устранения этого артефакта при задании вершин примитивов необходимо учитывать, что поверхность треугольника должна располагаться на небольшом расстоянии от эллипсоида. С помощью изменения расстояния от эллипсоида также возможно задавать порядок отображения нескольких пересекающихся изображений.

### **Ограниченнное текстурное наложение**

Наложение текстуры изображения на текстуру картографической основы было осуществлено с помощью следующей последовательности действий.

1. Расчет геодезических координат 4 угловых точек снимка с помощью геодезической привязки изображения.

2. Нормализация геодезических координат для приведения их к диапазону текстурных координат [0...1] эллипсоида с помощью приведенных ниже формул.

$$v = \frac{B + 90}{180}, u = \frac{L + 180}{360}$$

3. Расчет матрицы аффинных преобразований для дальнейшего пересчета текстурных координат накладываемого изображения во фрагментном шейдере. Для этого было составлено матричное уравнение, решаемое через 2 системы линейных уравнений.

$$\begin{pmatrix} u_1 & v_1 & 1 \\ u_2 & v_2 & 1 \\ u_3 & v_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \\ a_{13} & a_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u'_1 & v'_1 \\ u'_2 & v'_2 \\ u'_3 & v'_3 \end{pmatrix}.$$

Здесь  $(u_i, v_i)$  – нормализованные долгота и широта  $i$ -й угловой точки изображения;  $(u'_i, v'_i)$  – требуемые текстурные координаты для  $i$ -й угловой точки. В данной работе в качестве точек  $(u_i, v_i)$  были использованы левая верхняя, правая верхняя и правая нижняя точки изображения.

В результате решения СЛАУ определяются коэффициенты необходимой матрицы аффинных преобразований:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{13} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

4. Проверка во фрагментном шейдере попадания текущей точки в область наложения изображения.

5. Пересчет текстурных координат, если текущая точка попадает в заданную область. Так как во фрагментный шейдер передаются текстурные координаты, предназначенные для картографической основы, необходимо осуществлять пересчет этих координат в текстурные координаты для накладываемого изображения. В этом случае изображение будет целиком отображено в заданных пределах. Преобразование осуществляется с помощью умножения вычисленной ранее матрицы аффинных преобразований на вектор-столбец текущих текстурных координат.

В результате на эллипсоиде на заданных координатах отображается изображение без потери качества и без артефактов, присутствовавших при генерации дополнительной поверхности. Однако, при наложении нескольких изображений может потребоваться использование циклов во фрагментном шейдере, что снижает производительность программы.

## Заключение

Исходя из проведённого анализа, для визуализации данных ДЗЗ на трёхмерной модели Земного эллипсоида без потери разрешения и без необходимости модификации накладываемых изображений можно использовать способы создания искривлённых поверхностей и ограниченного текстурного наложения. Помимо прочего, эти методы позволяют накладывать текстуры на сложные геометрические объекты и динамически обновлять их. Однако, аэрокосмические снимки имеют большие размеры и для их эффективной визуализации также необходимо решить вопрос с быстрой загрузкой нужных фрагментов из внешней памяти.

Возможным решением для повышения быстродействия программы может стать переход на программный интерфейс Vulkan, который предлагает более высокую производительность, лучшую поддержку многопоточности и более современный подход к работе с графикой.

## Библиографический список

1. Kessenich J., Sellers G., Shreiner D., OpenGL® Programming Guide, Ninth Edition. - United States of America: Pearson Education, 2017.
2. Randi J. Rost, OpenGL® Shading Language, Second Edition. - United States of America: Pearson Education, 2006.
3. Осипова Т. А., Райков Н. А., Разработка алгоритма и программного моделя визуализации космических изображений на земном шаре/Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов/г. Рязань, (ноябрь 2024 г.). - Т. 2. - ИП Коняхин А. В., 2024, - С. 141 - 142.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

### ПОСТРОЕНИЕ КАРТИНЫ ДРЕЙФА ЛЕДОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

**А.А. Воронин, А.В. Соловьев, Д.А. Андреев**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, january2020da@gmail.com*

**Аннотация.** В статье рассматривается применение алгоритма триангуляции Делоне для построения карты дрейфа ледовых образований на основе спутниковых снимков. Описаны теоретические основы метода, включающие построение большого охватывающего треугольника, вычисление центров описанных окружностей треугольников и проверку условия Делоне. Экспериментальная часть демонстрирует применение алгоритма для анализа спутниковых изображений, что позволяет получать ценную информацию для мониторинга ледового покрова в арктическом регионе.

**Ключевые слова:** триангуляция Делоне, мониторинг дрейфа льда, спутниковые снимки, алгоритм обработки изображений, дистанционное зондирование Земли.

### DELAUNAY TRIANGULATION APPLICATION FOR ICE DRIFT MONITORING

**A.A. Voronin, A.V. Solovyov, D.A. Andreev**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, january2020da@gmail.com*

**The summary.** This paper presents an approach for constructing an ice drift map using Delaunay triangulation applied to satellite imagery. The theoretical basis of the method is discussed, including the creation of a super-triangle that encompasses all data points, computation of circumscribed circle centers of triangles, and Delaunay condition checking. The experimental section demonstrates the application of the algorithm for processing satellite images, providing valuable information for monitoring the ice cover in polar regions.

**Keywords:** Delaunay triangulation, ice drift monitoring, satellite imagery, image processing algorithm, remote sensing.

Информация о движении морского льда имеет ценность как для научных исследований, так и с практической точки зрения. Основой информационного обеспечения в решении поставленной задачи является спутниковое дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) [1]. В данной статье рассмотрен алгоритм построения карты дрейфа льда с применением триангуляции Делоне.

#### Актуальность темы

В современном мире активно поднимается вопрос освоения Арктики различными государствами. Так как хозяйственная деятельность в Арктике характеризуется экстремальными условиями, требуемое регулярное получение информации о состоянии окружающей среды в этом регионе становится весьма затруднительным. В связи с этим, принятие и переработка такой информации в удобный для работы с ней вид становятся актуальными. Полу-

чаемые данные о мониторинге дрейфа льда используются для оценки ледового режима арктических акваторий. Это позволяет запланировать деятельность и способ эксплуатации различных сооружений и платформ в этом регионе, для которых мониторинг дрейфа льда является важной задачей, требуемой для оценки их дальнейшего способа работы.

### Теоретическая часть

Триангуляцией называется планарное разбиение плоскости на фрагменты, один из которых – это внешняя бесконечная область, а остальные – треугольники [2]. Она выполняется для заданного множества точек набора  $S$ , при этом ни одна из точек из этого набора не попадает внутрь ни одной из описанных вокруг полученных треугольников окружностей [3]. Условие Делоне гласит, что никакая точка не должна лежать внутри окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника [4].

Данную триангуляцию можно рассматривать совместно с диаграммой Вороного для того же множества точек, поскольку они взаимно однозначно соответствуют друг другу: триангуляция Делоне отражает топологическую структуру связей точек множества  $S$ , а диаграмма Вороного – геометрическое расположение ячеек, содержащих точки плоскости, находящиеся на равноудалённом расстоянии от двух ближайших точек множества  $S$ .

Первым шагом триангуляции является создание «большого» треугольника, охватывающего все точки триангуляции. Его вершины задаются точками:

$$\begin{cases} A_{big} = (mid_x - 10 * d_{xy}, mid_y - 10 * d_{xy}) \\ B_{big} = (mid_x, mid_y + 10 * d_{xy}) \\ C_{big} = (mid_x + 10 * d_{xy}, mid_y - 10 * d_{xy}) \end{cases}, \quad (1)$$

где:  $mid_x = \frac{\max(x) + \min(x)}{2}$ ,  $mid_y = \frac{\max(y) + \min(y)}{2}$  – центр области исходных точек из множества  $S$  по осям X и Y соответственно;

$\min(x), \max(x), \min(y), \max(y)$  – минимальные и максимальные координаты по осям X и Y;

$d_{xy} = \max(\max(x) - \min(x), \max(y) - \min(y))$  – размеры области, в которой производится триангуляция.

Затем для каждого треугольника с вершинами  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  ищется пересечение серединных перпендикуляров двух сторон для нахождения центра описанной окружности. Например, если  $|y_1 - y_2| < \varepsilon$ , угловой коэффициент серединного перпендикуляра равен

$m_2 = \frac{-x_3 - x_2}{y_3 - y_2}$ , а центр вычисляется как:

$$x_c = \frac{x_1 + x_2}{2}, y_c = m_2 * (x_c - m_{x2}) + m_{y2}, \quad (2)$$

где  $(m_{x2}, m_{y2}) = (\frac{x_2 + x_3}{2}, \frac{y_2 + y_3}{2})$  – середина другой стороны треугольника с вершинами  $(x_2, y_2), (x_3, y_3)$ .

В случае  $|y_2 - y_3| < \varepsilon$  угловой коэффициент серединного перпендикуляра вычисляется как  $m_1 = \frac{-x_2 - x_1}{y_2 - y_1}$ , откуда центр окружности будет рассчитываться как:

$$x_c = \frac{x_2 + x_3}{2}, y_c = m_1 * (x_c - m_{x1}) + m_{y1}, \quad (3)$$

где  $(m_{x_1}, m_{y_1}) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2}\right)$  - середина другой стороны треугольника с вершинами  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ .

Далее для каждого треугольника вычисляется радиус описанной окружности:  $r = \sqrt{(x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2}$ . Проводится проверка, находится ли какая-либо точка из набора S в окружности:

$$\sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2} \leq r + \varepsilon, \quad (4)$$

которая помогает выявить треугольники, где не выполняется условие Делоне. Эти треугольники не учитываются при итоговом разбиении плоскости на фрагменты, и триангуляция продолжается до тех пор, пока все треугольники не будут соответствовать условию Делоне.

### Экспериментальная часть

Карта дрейфа представляет собой регулярную сетку, каждый узел которой - начало вектора. Для расчёта векторов определена функция, получающая на вход массив векторов и координаты точки и возвращающая вектор дрейфа в данной точке.

Для расчета вектора дрейфа в произвольно заданной точке необходимо определить, какие вектора из исходного набора будут учтены.

Если точка не принадлежит ни одному треугольнику в триангуляционной картине, то вектор дрейфа в этой точке рассчитывается по двум ближайшим к ней исходным векторам с учетом весовых коэффициентов  $W_0$  и  $W_1$ , обратно пропорциональным расстояниям до начал этих исходных векторов  $d_0$  и  $d_1$ :

$$W_0 = 1 - \frac{d_0}{d_0 + d_1}, W_1 = 1 - \frac{d_1}{d_0 + d_1}. \quad (5)$$

Результатом будет проекция результирующего вектора дрейфа  $\mathbf{r}$  на оси X и Y:

$$\begin{cases} res_x = \frac{(\Delta x_0 * W_0 + \Delta x_1 * W_1)}{2} \\ res_y = \frac{(\Delta y_0 * W_0 + \Delta y_1 * W_1)}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

Если же точка находится внутри одного из треугольников триангуляции Делоне, то будут учтены три вектора, являющихся вершинами этого треугольника.

Тогда весовые коэффициенты векторов в вершинах треугольника:

$$W_i = \frac{d_i}{d_{общ}}, d_{общ} = \sum_{i=1}^3 d_i. \quad (7)$$

Тогда проекции результирующего вектора дрейфа на оси X и Y вычисляются как:

$$\begin{cases} res_x = \sum_{i=1}^3 (\Delta x_i * W_i) \\ res_y = \sum_{i=1}^3 (\Delta y_i * W_i) \end{cases}, \quad (8)$$

где  $\Delta x_i, \Delta y_i$  – величины, отражающие сдвиг точки по осям X и Y в сравнении с начальным положением.

Вектор дрейфа в произвольно заданной точке рассчитывается как сумма векторов, учитываемых для данной точки, с весовыми коэффициентами, обратно пропорциональными расстоянию от точки до начала вектора.

Для проведения эксперимента были использованы два снимка одного региона, полученные с некоторым временным интервалом (рисунки 1 и 2):

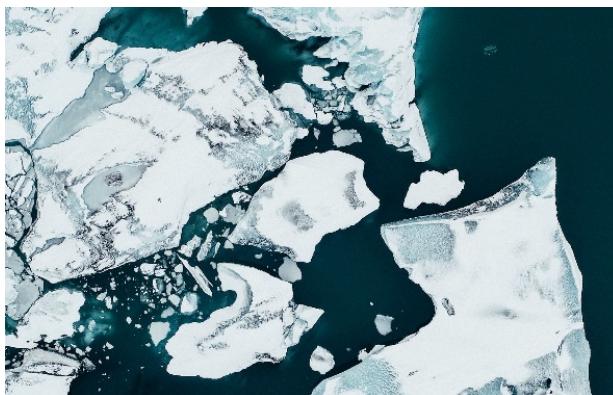


Рис. 1. Более ранний снимок



Рис. 2. Более поздний снимок

На обоих снимках были выделены объекты, смещенные водным течением за период между сеансами съемки. Далее был применен описанный выше алгоритм, на основе которого была построена карта дрейфа льда (рисунок 3):

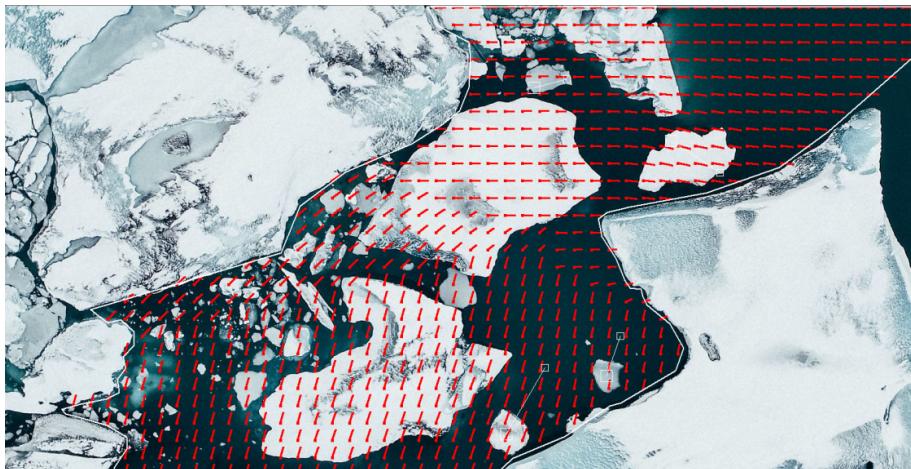


Рис. 3. Построенная карта дрейфа льда

### Заключение

Задача мониторинга дрейфа льда является актуальной в современном мире. Её решение позволяет получить информацию для ведения различных видов хозяйственной деятельности в арктическом регионе. В статье приведен пример использования данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга дрейфа ледовых образований.

### Библиографический список

1. Алексанин А. И., Кубряков А. А., Левин В. А., Станичный С. В. Новые технологии освоения Арктики: спутниковое информационное обеспечение для организации разведки и эксплуатации нефтегазовых месторождений в арктических морях. – 2015. – С. 1–3.
2. Пауков Д. П. Триангуляция Делоне: итеративные алгоритмы построения триангуляции // ДонНТУ. – С. 1.
3. Пауков Д. П. Триангуляция Делоне: итеративные алгоритмы построения триангуляции // ДонНТУ. – С. 2.
4. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Томского университета, 2002. – 128 с. – Стр. 8.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

## АЛГОРИТМ ВЕКТОРИЗАЦИИ ГРАНИЦ ПЛОЩАДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА РАСТРОВЫХ КАРТАХ

А.А. Воронин, Д.А. Кузнецов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, cuznetsov.dmitri2003@yandex.ru

**Аннотация.** В данной работе рассматривается алгоритм векторизации границ площадных объектов на растровых изображениях, представленный в виде последовательности этапов. Предложенный алгоритм позволяет выделять замкнутые контуры, используя информацию о внутренних точках. Проведен анализ временной сложности алгоритма, показано, что он работает за линейное время. Обсуждаются достоинства и ограничения метода, а также его применение в полуавтоматической векторизации изображений ледового покрова.

**Ключевые слова:** векторизация растровых контуров, алгоритмы обработки растров, выделение границ.

## ALGORITHM OF VECTORIZATION THE BOUNDARIES OF AREAL OBJECTS ON RASTER MAPS

А.А. Воронин, Д.А. Кузнецов

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, cuznetsov.dmitri2003@yandex.ru

*The summary.* In this paper, we consider an algorithm of vectorization the boundaries of areal objects on bitmap images, presented as a sequence of steps. The proposed algorithm makes it possible to identify closed contours using information about internal points. The analysis of the time complexity of the algorithm is carried out, it is shown that it works in linear time. The advantages and limitations of the method are discussed, as well as its application in semi-automatic vectorization of images of the ice cover.

*Keywords:* vectorization of raster contours, raster processing algorithms, boundary extraction.

### Введение

Для мониторинга изменений ледового покрова используются спутниковые снимки интересующих регионов, на которых границы ледовых полей определяются экспертным методом с применением растровых инструментов оконтуривания. Однако растровый формат границ менее удобен для автоматизированного анализа и интеграции в геоинформационные системы по сравнению с векторным представлением. Основная трудность векторизации заключается в точном определении границ ледовых полей, особенно при обработке смежных контуров, а также в оптимизации их векторного представления [1].

Ледовое поле, представленное на спутниковых изображениях, можно рассматривать как совокупность замкнутых контуров, отделяющих один тип ледяного покрова от другого и от водной поверхности. В некоторых подходах к решению данной задачи применяется комбинация ручной разметки и автоматической обработки изображений. На первом этапе оператор вручную выделяет контуры ледовых полей, создавая вспомогательный растровый слой. Затем, на основе этой предварительной разметки, выполняется автоматическая идентификация контуров и их преобразование в векторный формат [2].

Основной задачей данной статьи является описание алгоритма векторизации границ площадных объектов на основе растровых карт, созданных вручную. Данный алгоритм должен эффективно обрабатывать изображения с большим количеством контуров.

### Описание алгоритма

В данной работе предлагается алгоритм, который на основе растрового изображения и заранее заданных внутренних точек контуров строит векторное описание ледовых полей (контуров). Данный алгоритм последовательно выделяет замкнутый контур и создает его

векторное описание. Основной целью предложенного метода является создание эффективного способа векторизации растровых контуров с учетом специализированных входных данных.

Важной особенностью предложенного алгоритма является его способность работать за линейное время относительно количества точек в контуре. Это делает его подходящим для обработки больших объемов данных, таких как спутниковые снимки, в которых количество контуров может быть значительным. Однако алгоритм имеет и ряд ограничений: он требует предварительной ручной разметки внутренних точек и т.д.

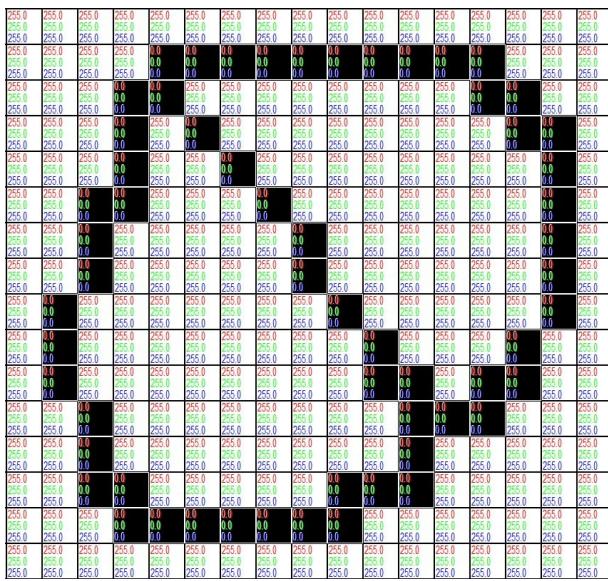


Рис. 1. Пример замкнутых контуров на растровом изображении

Входные данные для алгоритма представляют собой следующие сущности: растровое изображение, где для каждого контура заданы координаты одной внутренней фоновой точки, а точки любого другого цвета принадлежат контуру. Пример такого изображения показан на рисунке 1. Количество контуров, которое необходимо определить, заранее известно – это размер массива внутренних точек контуров.

Алгоритм векторизации одного растрового контура разделен на 6 этапов.

1 Этап. Поиск начальной точки, принадлежащей контуру.

Поиск начальной точки контура заключается в итеративном поиске вправо черной точки относительно внутренней точки контура. Найденная точка добавляется в контур.

2 Этап. Определение и начальная инициализация базовой точки.

Рассмотрим окно 3 на 3 точки. Базовая точка – точка, которая находится в центре окна 3 на 3 точки. Изначально базовая точка инициализируется точкой, находящейся слева от начальной точки контура, определенной на этапе 1.

3 Этап. Определение контурных точек вокруг базовой точки.

Для начала необходимо определить стартовую точку для обхода вокруг базовой точки в рамках окна 3 на 3.

Стартовая точка для обхода вокруг базовой определяется следующим образом:

а) вокруг базовой точки производится поиск точки, совпадающей с последней добавленной в контур;

б) стартовая точка для обхода – следующая по часовой стрелке после найденной в пункте а.

Начиная со стартовой точки производится обход по часовой стрелке точек, расположенных вокруг базовой. Для каждой точки выполняются следующие действия в зависимости от условия:

- если текущая точка является точкой контура, то добавляем её в контур;
- иначе, если текущая точка является фоновой и расстояние от неё до последней точки, добавленной в контур, менее порогового максимального значения (например, равного двум), то переходим к следующей точке;
- иначе заканчиваем обход (возможно, не обойдя все точки) и переходим к этапу 4.

#### 4 Этап. Определение новой базовой точки.

Относительно текущей базовой точки ищется новая. За новую базовую точку принимается точка, которая следует по часовой стрелке после последней точки, добавленной в контур.

#### 5 Этап. Проверка условия окончания обхода контура.

На данном этапе требуется проверить, закончился ли обход или нет. Если новая базовая точка совпала с начальной базовой точкой, определенной на этапе 2, то переходим к следующему этапу, иначе переходим к этапу 3.

#### 6 Этап. Добавление упущеных точек.

Повторяем единократно этап 3 без перехода к этапу 4 относительно последней (или начальной) базовой точки, так как не все точки были добавлены при первой обработке этой базовой точки.

### Пример

Имеется некоторый растр с замкнутым контуром и внутренней точкой для него. В результате первого этапа найдется первая точка контура – точка с номером 8, которая изображена на рисунке 2.

Во время второго этапа определится начальная базовая точка – точка расположенная в центре окна 3 на 3.

255.0	0.0	255.0
255.0	5.0	255.0
255.0	0.0	255.0
255.0	0.0	255.0
255.0	255.0	0.0
255.0	4	255.0
255.0	255.0	0.0
255.0	255.0	0.0
255.0	255.0	255.0
255.0	3	255.0
255.0	255.0	255.0
255.0	255.0	255.0

Рис. 2. Порядок обхода точек вокруг начальной базовой точки

Во время выполнения третьего этапа найдется стартовая точка для обхода вокруг базовой – точка с номером 1 (следующей по часовой стрелке после 8). Обход точек производится по часовой стрелке. На этом этапе определяются точки для контура. Этап закончится во время обработки точки с номером 3, так как она находится на расстоянии большем чем 2 (при условии, что пороговое максимальное расстояние равно двум) от последней точки (номер 8) в контуре.

На 4-ом этапе определится новая базовая точка – точка с номером 1, так как она следует после последней точки (номер 8) в контуре.

Во время 5-го этапа проверяется, равна ли новая базовая точка начальной. Если условие истинно, то переходим к этапу 6. Иначе итеративно повторяем этапы 3-5 до тех пор, пока условие на этапе 5 ложно.

На последнем 6-ом этапе добавляются точки, которые были пропущены во время первого выполнения 3-го этапа.

### **Временная сложность алгоритма**

Временная сложность алгоритма вычисляется следующим образом. Пусть весь растр, в который полностью помещается контур, имеет размер  $n$  на  $m$  точек. Контур, который необходимо определить, имеет  $k$  точек. Тогда, чтобы найти начальную точку контура, требуется в худшем случае порядка  $m$  операций. Определение базовой точки происходит за константное время. Поиск и добавление в контур точек происходит за  $k$  операций. Итого имеется временная сложность  $O(m + k + 1)$ .

Так как  $k$  в любом случае больше  $m$ , то алгоритм выполняется за линейное время, зависящее от количества точек в контуре -  $O(k)$ .

### **Пространственная сложность алгоритма**

Пусть весь растр имеет размер  $n$  на  $m$  точек. Количество контуров, которое необходимо определить –  $t$ . Для каждого контура нужно хранить внутреннюю точку, всего  $t$  точек. Контура, которые необходимо определить, в среднем имеют по  $k$  точек. Тогда, чтобы определить все  $t$  контуров потребуется памяти:

$$O(nt + tk + t),$$

где  $nt$  – память для раstra,  $tk$  – память для всех контуров,  $t$  – память для внутренних точек.

Однако если не учитывать память для хранения входных данных – раstra и внутренних точек контуров, то отдельно для каждого контура потребуется в среднем порядка  $O(k)$  памяти.

### **Преимущества и недостатки алгоритма**

Плюсами данного алгоритма являются.

*Линейная временная сложность.* Алгоритм выполняет операции за время, пропорциональное количеству точек в контуре, что делает его эффективным для обработки больших изображений.

*Простота реализации.* Метод не требует сложных вычислительных процедур и может быть легко реализован с помощью различных языков программирования.

Однако данный алгоритм обладает минусами.

*Необходимость первоначальной ручной обработки.* Входные изображения требуют предварительной обработки изображений и разметки внутренних точек, что увеличивает трудоемкость процесса.

*Контуры должны быть замкнутыми.* Метод не работает с открытыми или разорванными контурами, что ограничивает его применимость.

*Шумы на изображении.* После ручной обработки изображения из-за человеческого фактора имеется ненулевая вероятность появления шумов на обработанном растровом изображении.

### **Заключение**

В данной работе представлен алгоритм векторизации растровых контуров на растровых изображениях. Проведен анализ временной сложности. Показано, что алгоритм работает за линейное время относительно числа точек в контуре. Однако алгоритм требует предварительной ручной разметки внутренних точек и предполагает замкнутость контуров.

Таким образом, предложенный алгоритм векторизации растровых контуров обладает линейной временной сложностью относительно числа точек в контуре, что делает его эффективным для обработки изображений с большим количеством контуров.

## Библиографический список

1. Кузнецов Д.А. Векторизация контуров ледовых полей // Новые информационные технологии в научных исследованиях – 2024. Том 2. Рязань. РГРТУ. С. 134-135.
2. Гусев С. С. Векторизация растровых изображений // Прикладная математика и вопросы управления. 2018. № 4. С. 83-98.

УДК 004.94; ГРНТИ 50.53

## ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ К МНОГОМЕРНЫМ АЛГОРИТМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ

А.А. Кокунов, А.И. Таганов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kaa62r@gmail.com

**Аннотация.** В работе рассматриваются методологические вопросы анализа методов оптимизации надежности и моделей алгоритмических процессов на этапе системного проектирования информационных систем. Формализована задача применения алгоритма градиентного поиска в оптимизации надежности алгоритмических процессов. Анализируются методы расчета градиента для многомерных алгоритмических процессов применительно к оптимизации надежности информационных и иных систем представленных в виде алгоритмических процессов.

**Ключевые слова:** информационная система, алгоритмический процесс, модели алгоритмических процессов, оператор алгоритмического процесса, оптимизация надежности алгоритмического процесса, градиентная оптимизация.

## APPLICATION OF GRADIENT OPTIMIZATION TO MULTIDIMENSIONAL ALGORITHMIC PROCESSES

A.A. Kokunov, A.I. Taganov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, kaa62r@gmail.com

*The summary.* The paper examines methodological issues of analyzing methods for optimizing reliability and models of algorithmic processes at the stage of system design of information systems. The problem of applying the gradient search algorithm in optimizing the reliability of algorithmic processes is formalized. The methods for calculating the gradient for multidimensional algorithmic processes are analyzed in relation to optimizing the reliability of information and other systems presented in the form of algorithmic processes.

*Keywords:* information system, algorithmic process, models of algorithmic processes, operator of algorithmic process, optimization of reliability of algorithmic process, gradient optimization.

В современном проектировании технологических процессов и информационных систем используется подход теоретической оценки надежности на этапе проектирования системы. В большинстве случаев функционирование систем такого рода, т.е. систем с дискретным поведением удобно рассматривать с помощью представления структуры системы в виде алгоритмического процесса (АП) [1 - 7]. Такой вид представления открывает широкие возможности анализа рассматриваемой системы, в том числе в плане показателей надежности, времени выполнения и стоимости.

Одной из подзадач оценки надежности является оптимизация контролей в АП. Данную задачу можно разделить на задачу расстановки контролей и на задачу выбора кратности контролей. Общая постановка данных задач рассмотрена в работе [8]. Одним из вариантов решения является применение градиентной оптимизации.

### Применение градиентного поиска в надежности АП

Сутью градиентного поиска является аппроксимирование целевой функции в направлении градиента с целью нахождения максимума («Градиентное восхождение») или же наоборот в обратном градиенту направлении – для нахождения минимума («Градиентный спуск»). Применение данного подхода для бинарной концепции учета ошибок предложено в [9]. В данной работе будет рассмотрена итеративная процедура изменения значения одной управляемой переменной с целью улучшения градиента контроля. Градиент контроля представляет собой следующее отношение:

$$\nabla_i(x_i) = \frac{\Delta p^1(X, x_i)}{\Delta C(X, x_i)},$$

где  $\Delta p^1(X, x_i)$  – приращение вероятности безошибочного выполнения АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора  $A_i$ ;

$\Delta C(X, x_i)$  – приращение стоимости выполнения АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора  $A_i$ .

В данном случае градиент показывает относительную эффективность внедрения дополнительного контроля с доработкой в рамках выполнения АП. Обобщим данное выражение на случай многомерной концепции учета ошибок:

$$\nabla_i(x_i) = \frac{P(X, x_i = x_i + 1) - P(X, x_i)}{C(X, x_i = x_i + 1) - C(X, x_i)},$$

где числитель – приращение матрицы модели надежности АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора  $A_i$ ;

знаменатель – приращение стоимости выполнения АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора  $A_i$ .

Введем следующие обозначения для упрощения указанного выше выражения, с целью ускорения вычислений и избежания двойственности вычислений:

- $A_i$  – рабочий оператор  $i$ ;
- $\omega_i$  – оператор контроля  $i$ ;
- $U_i$  – оператор доработки  $i$ ;
- $P_{A_i}$  – матрица модели надежности оператора  $A_i$ ;
- $K_\omega^1$  – матрица модели надежности оператора контроля  $\omega$ , при условии, что ошибка не обнаружена (включая ситуации пропуска ошибки);
- $K_\omega^0$  – матрица модели надежности оператора контроля  $\omega$ , при условии, что ошибка обнаружена (включая ситуации ложного обнаружения ошибки);
- $P_{U_i}$  – матрица модели надежности оператора  $U_i$ ;
- $C_{U_i}$  – стоимость выполнения оператора  $U_i$ ;
- $P_Z$  – оператор обновления;
- $E$  – единичная матрица.

Матрицы моделей надежности операторов подробнее рассмотрены в работе [3].

Упрощенные значения числителя и знаменателя примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
P(X, x_i = x_i + 1) - P(X, x_i) &= \left( P_{A_i}(x_i + 1) \cdot \prod_{r=1..n, r \neq i} P_{A_r}(x_r) \right) - \left( P_{A_i}(x_i) \cdot \prod_{r=1..n, r \neq i} P_{A_r}(x_r) \right) = \\
&= \left( P_{A_i} \cdot \left( K_{\omega_i}^1 + K_{\omega_i}^0 \cdot P_{U_i} \right)^{x_i+1} \cdot P_Z - P_{A_i} \cdot \left( K_{\omega_i}^1 + K_{\omega_i}^0 \cdot P_{U_i} \right)^{x_i} \cdot P_Z \right) \cdot \prod_{r=1..n, r \neq i} P_{A_r}(x_r) \cdot P_Z = \\
&= P_{A_i} \cdot \left( K_{\omega_i}^1 + K_{\omega_i}^0 \cdot P_{U_i} \right)^{x_i} \cdot P_Z \cdot \left( K_{\omega_i}^1 + K_{\omega_i}^0 \cdot P_{U_i} - E \right) \cdot P_{A_i}^{-1}(x_i) \cdot P_Z \cdot P(X) \cdot P_Z = \\
&= P_{A_i} \cdot B_i^{x_i} \cdot P_Z \cdot (B_i - E) \cdot P_{A_i}^{-1}(x_i) \cdot P_Z \cdot P(X) \cdot P_Z \\
C(X, x_i = x_i + 1) - C(X, x_i) &= \left( c_{A_i}(x_i + 1) + \sum_{r=1..n, r \neq i} c_{A_r}(x_r) \right) - \left( c_{A_i}(x_i) + \sum_{r=1..n, r \neq i} c_{A_r}(x_r) \right) = \\
&= \left( c_{A_i} + (x_i + 1) \cdot c_{\omega_i} + c_{U_i} \cdot \sum_{j=1}^m \left( p_{A_i}^{0_j} \cdot \left( 1 - (k_{\omega_i}^{01_j})^{x_i+1} \right) \right) \right) - c_{A_i} - x_i \cdot c_{\omega_i} - c_{U_i} \cdot \sum_{j=1}^m \left( p_{A_i}^{0_j} \cdot \left( 1 - (k_{\omega_i}^{01_j})^{x_i} \right) \right) = \\
&= c_{\omega_i} + c_{U_i} \cdot \sum_{j=1}^m \left( p_{A_i}^{0_j} \cdot (k_{\omega_i}^{01_j})^{x_i} \cdot k_{\omega_i}^{00_j} \right)
\end{aligned}$$

Таким образом градиент для случая многомерной концепции учета ошибок примет вид:

$$\nabla_i(x_i) = \frac{P_{A_i} \cdot B_i^{x_i} \cdot P_Z \cdot (B_i - E) \cdot P_{A_i}^{-1}(x_i) \cdot P_Z \cdot P(X) \cdot P_Z}{c_{\omega_i} + c_{U_i} \cdot \sum_{j=1}^m \left( p_{A_i}^{0_j} \cdot (k_{\omega_i}^{01_j})^{x_i} \cdot k_{\omega_i}^{00_j} \right)}, \quad (1)$$

где  $B_i = K_{\omega_i}^1 + K_{\omega_i}^0 \cdot P_{U_i}$  - вероятность доработки при обнаружении ошибки введенным контролем после рабочего оператора  $A_i$ .

Расчет градиента по данной формуле ускоряется вследствие отсутствия необходимости пересчета показателей  $P(X, x_i = x_i + 1)$  и  $C(X, x_i = x_i + 1)$  для всех  $x_i$  (матрица  $P(X)$  в данном случае не меняется).

Первый элемент результирующей матрицы будет соответствовать отношению приращения вероятности безошибочного выполнения АП к приращению стоимости по результатам введения дополнительного контроля с доработкой после рабочего оператора  $A_i$ . Остальные элементы первой строки будут представлять собой отношения приращений пониженных вероятностей ошибок разных типов к приращению стоимости.

### Программная реализация

Рассмотрим задачу расстановки контрольных точек при заданных ограничениях на безошибочность и ограничениях на ошибки разных типов. Реализованный алгоритм аппроксимирует матрицу надежности АП к заданному вектору ограничений при этом минимизирует затраты, т.е. стоимость выполнения АП.

На каждой итерации алгоритма вектор управляемых переменных, он же вектор контролей будет выглядеть следующим образом:

$$X^k = \{x_0^k, x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k\},$$

где  $k$  – номер итерации;

$x_i$  – определяет наличие ( $x_i = 1$ ) или отсутствие ( $x_i = 0$ ) контроля после  $i$ -го рабочего оператора.

Исходный вектор контролей будет определяться следующим образом:

$$x_i^0 = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{A_i}^1 < P^* \text{ и } p_{A_i}^{0_j} > q_j^*, j = 1..m \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, i = 1..n$$

Исходные данныечитываются из файлов и включают в себя минимальный набор для формирования матриц каждого оператора. Формат файлов можно увидеть на рисунке 1. Каждая строка – характеристики одного оператора алгоритмического процесса. Параметры оптимизации задаются в интерфейсе программы и включают в себя целевой уровень безошибочности и вектор ограничений для типов ошибок.

	p01	p02	p03	p04	p05	c
1	0.002345	0.005678	0.008912	0.003456	0.009123	345
2	0.001234	0.006789	0.007654	0.004321	0.008765	287
3	0.003456	0.005432	0.009876	0.002345	0.007654	312
4	0.004567	0.003210	0.008765	0.005432	0.009876	398
5	0.001987	0.006543	0.007890	0.004321	0.008654	276
6	0.002345	0.005678	0.009123	0.003456	0.007890	324
7	0.003210	0.004567	0.008765	0.002345	0.009876	356
8	0.001234	0.006789	0.007654	0.004321	0.008765	289
9	0.003456	0.005432	0.009876	0.002345	0.007654	315
10	0.004567	0.003210	0.008765	0.005432	0.009876	401
11	0.001987	0.006543	0.007890	0.004321	0.008654	278
12	0.002345	0.005678	0.009123	0.003456	0.007890	329
13	0.003210	0.004567	0.008765	0.002345	0.009876	362
14	0.001234	0.006789	0.007654	0.004321	0.008765	291
15	0.003456	0.005432	0.009876	0.002345	0.007654	318
16	0.004567	0.003210	0.008765	0.005432	0.009876	405
17	0.001987	0.006543	0.007890	0.004321	0.008654	280
18	0.002345	0.005678	0.009123	0.003456	0.007890	334
19	0.003210	0.004567	0.008765	0.002345	0.009876	368
20						

Рис. 1. Формат файла исходных данных

Алгоритм оптимизации включает в себя расчет градиента по формуле (1) для каждого оператора без контрольной операции согласно исходного вектора контролей. После чего определяется максимальный градиент по показателю вероятности безошибочного выполнения, т.е. по первому элементу первой строки матрицы градиента. Соответствующий элемент вектора контролей становится 1. Далее вычисляется матрица надежности АП в целом и, если условия (параметры оптимизации) не удовлетворены, цикл повторяется.

Далее на втором участке алгоритма рассматривается итоговый вектор контролей и проходом по данному вектору снимаются поочередно контроли и рассчитываются показатели АП. Если показатели удовлетворяют условиям, то номер данного контроля заносится в буфер. После прохода по всему вектору, если буфер пуст, то алгоритм завершает свою работу. Если нет – то сравниваются стоимости этих контролей и элемент с наибольшей стоимостью убирается из итогового вектора контролей. Пока условия (параметры оптимизации) не будут удовлетворены, цикл повторяется.

На рисунке 2 представлен результат работы программы. В данном случае оптимизация применялась к АП из 30 рабочих операторов, в котором возможны 5 типов ошибок. Предоставляется пошаговая информация по оптимизации, график соотношения стоимости и вероятности безошибочного выполнения АП и итоговый результат оптимизации.

Результат работы программы можно показать в виде протокола оптимизации (см. таблицу 1). Из данной выноски видно, что целевой уровень безошибочности и критерии по 1, 2 и 4 типу ошибок были достигнуты на 22-й итерации, все критерии удовлетворены к 26-й итерации. Второй участок алгоритма в данном случае задействован не был, т.к. показатель  $p_{A_i}^{0_3}(X)$  близок к максимально допустимому значению и при проходе по итоговому вектору контролей буфер оказался пуст.

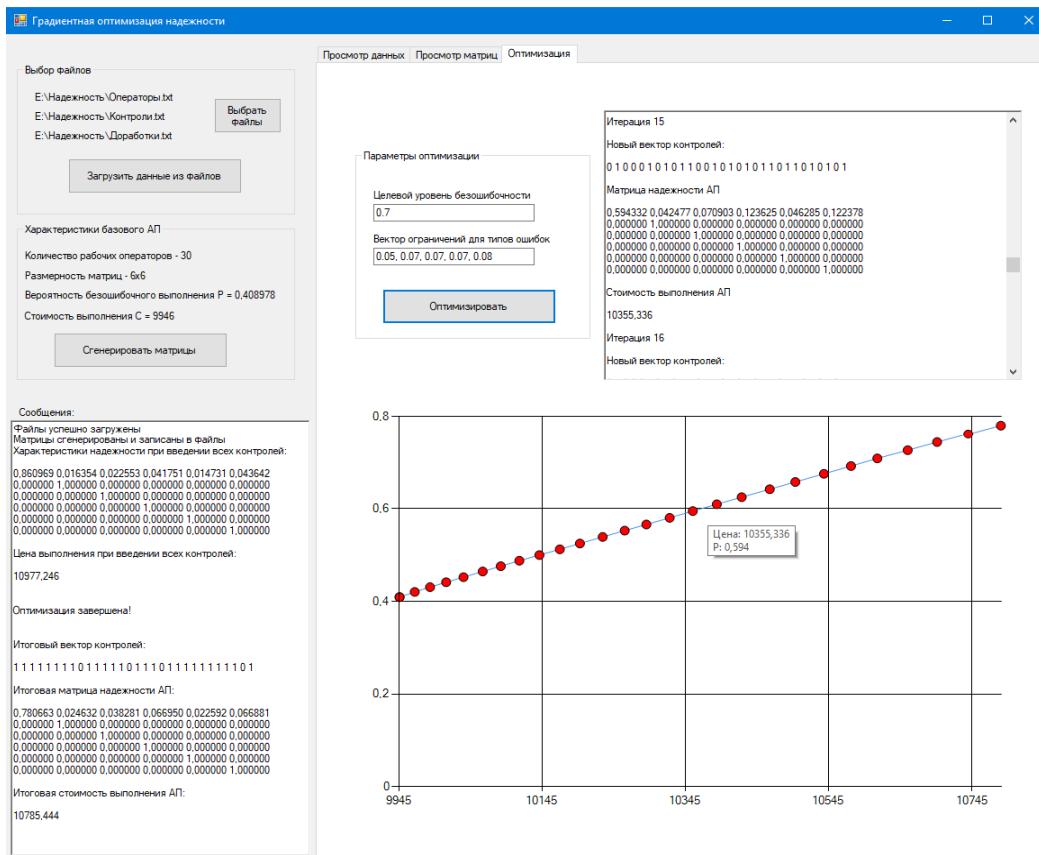


Рис. 2. Результат работы программы

Таблица 1. Изменение показателей АП на итерациях градиентной оптимизации

Nº	X	$p^1(X)$	$p^{0_1}(X)$	$p^{0_2}(X)$	$p^{0_3}(X)$	$p^{0_4}(X)$	$p^{0_5}(X)$	C(X)
0	0000000000000000 0000000000000000	0,4089	0,0555	0,1090	0,1747	0,0752	0,1764	9946
1	0000000000000000 0000000000000100	0,4202	0,5391	0,1080	0,1716	0,0732	0,1731	9967,2
...								
22	110101110110110 111011111011101	<b>0,7080</b>	<b>0,0306</b>	<b>0,0526</b>	0,0899	<b>0,0311</b>	0,0876	10613
...								
25	111101110111110 111011111111101	<b>0,7616</b>	<b>0,0256</b>	<b>0,0426</b>	0,0721	<b>0,0258</b>	<b>0,0722</b>	10740
26	111111110111110 111011111111101	<b>0,7807</b>	<b>0,0246</b>	<b>0,0383</b>	<b>0,0670</b>	<b>0,0226</b>	<b>0,0669</b>	10785

Данный алгоритм с небольшими изменениями может использоваться для задачи расстановки контрольных точек при ограниченных ресурсах, в этом случае вместо целевой вероятности безошибочного выполнения в условиях будет задаваться целевая стоимость выполнения и при ее исчерпании на первом участке алгоритма начинается второй, последовательно снимая контроли для возврата в допустимые границы цены.

Также для этих задач можно использовать алгоритм для градиентной оптимизации кратности контролей. Для этого вместо установки 0 и 1 в вектор контролей необходимо вычертить или прибавлять 1. Расчет градиента по формуле (1) предусматривает возможность наличия многократных контролей.

## **Результаты и выводы**

После проверки работы программы на различных наборах данных можно сделать вывод, что градиентные алгоритмы оптимизации хорошо работают, когда допустимые вероят-

ности ошибок разных типов приблизительно одинаковы. Для задач, где данные критерии сильно разнятся, необходимо использовать другие методы (примером могут являться генетические алгоритмы), или же можно доработать данный алгоритм путем оценки градиента недостигнутого параметра, т.е., если вероятность безошибочного выполнения была достигнута на текущей итерации, то на следующей ищется минимальный градиент вероятности выполнения с ошибкой того типа, по которому ограничения не достигнуты.

В целом данный алгоритм применим для оптимизации надежности АП на этапе проектирования систем и для анализа и модернизации уже поставленных процессов путем задачи исходного вектора управляемых переменных.

### **Библиографический список**

1. Кокунов А.А., Таганов А.И. Модельное представление типовых структур алгоритмических процессов информационных систем для задач оценки надежности и оптимизации. В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023. Сборник трудов VI международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2023. С. 24 – 29.
2. Кокунов А.А. Принципы оценки надежности алгоритмических процессов информационных систем. В сборнике: Материалы VIII научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2022. С. 228 – 229.
3. Кокунов А.А., Таганов А.И. Модельное представление операторов алгоритмических процессов информационных систем для задач оценки надежности и оптимизации. В сборнике: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань, 2022. С. 210 – 218.
4. Ротштейн А.П., Штовба С.Д., Козачко А.Н. Моделирование и оптимизация надежности многомерных алгоритмических процессов. – Винница: «УНИВЕРСУМ-Вінниця», 2007. – 215 с.
5. Таганов А.И., Гильман Д.В. Методологические основы анализа и аттестации уровней зрелости процессов программных проектов в условиях не-четкости. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. - 168 с.
6. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Нечеткая надежность алгоритмических процессов. – Винница: Континент – ПРИМ, 1997.– 142 с.
7. Таганов А.И. Методика анализа и сокращения рисков проектов сложных программных систем по характеристикам качества // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 31. - С. 77-82.
8. Кокунов А.А., Таганов А.И. Задача оптимизации контролей в многомерных алгоритмических процессах информационных систем. В сборнике: Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. Рязань, 2024. – С. 372 – 378.
9. Ротштейн А. П., Кузнецов П. Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. – К.: Техника, 1992. – 180 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.15

## **РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА СЕГМЕНТАЦИИ ОБЛАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПАРАНТНОСТИ**

**Н.А. Шапошников**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, shaposhnikov.nikita22007@yandex.ru*

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются результаты и особенности реализации алгоритма выделения облачности на фотоснимке на основе оценки диспарантности пикселей предполагаемого облачного объекта. Приводятся основные трудности и выбранные алгоритмы, а также сделаны упрощения формул при практической реализации алгоритма. Выделены преимущества и недостатки рассматриваемого алгоритма. Приведён пример работы алгоритма.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, сегментация облаков, диспарантность, байесовский классификатор, спектрозональные снимки.

## IMPLEMENTATION OF AN ALGORITHM FOR SEGMENTATION OF CLOUD OBJECTS ON SPECTRAL SATELLITE IMAGES USING DISPARITY

N.A. Shaposhnikov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Shaposhnikov.nikita22007@yandex.ru*

*The summary.* This paper examines the results and features of the implementation of an algorithm for highlighting clouds in a photograph based on an assessment of the pixel disparity of an assumed cloud object. The main difficulties and selected algorithms are given, as well as a way to simplify formulas in the practical implementation of the algorithm. The advantages and disadvantages of the algorithm under consideration are highlighted. An example of lagorhythm operation is given.

*Keywords:* remote sensing of the Earth, cloud segmentation, disparity, Bayesian classifier, spectral images..

Одним из первых этапов наземной обработки данных дистанционного зондирования Земли является выделение облачных объектов, представленных на спутниковых изображениях. Эта операция выполняется, как правило, в ходе каталогизации маршрутов съёмки и используется для оценки качества материалов съёмки. На основе параметра, характеризующего долю облачных объектов по отношению ко всей площади снимка, принимается решение об организации повторной съёмки требуемой территории. При выдаче потребителям выходной продукции каждый снимок сопровождается маской качества, в которой отмечены пиксели, принадлежащие облачным объектам и затенённым участкам земной поверхности.

За основу практической реализации был взят алгоритм, описанный в статье «Автоматическая сегментация облачных объектов на снимках земной поверхности высокого пространственного разрешения» [1].

### Краткое описание алгоритма

Во взятой за основу статье выделение границ облачных объектов происходит в несколько этапов:

1. Линейное контрастирование изображения путём отсечения по 2.5% пикселей с каждого конца гистограммы для каждого канала;
2. Поиск «ядер облачности» как серых объектов на основе отклонения яркости пикселя в канале от среднего значения яркости этого пикселя по всем каналам;
3. Формирование обучающей выборки для байесовского классификатора путём эрозии, дилатации и расширения выделенных на предыдущем этапе областей;
4. Применение байесовского классификатора к каналу с наибольшей контрастностью;
5. Векторизация полученных областей;
6. Фильтрация по площади;
7. Фильтрация по высоте. Высота оценивается по диспарантности пикселей оцениемых объектов. Диспарантность вычисляется на основе расстояния между одним и тем же контуром в разных каналах.

Данный алгоритм выделения облачности основан на том факте, что в процессе спектрональной съемки для высотных объектов возникает стереоэффект, позволяющий оценить высоту этих объектов.

Рассмотрим трудности и способы их преодоления, возникшие в процессе реализации предложенного алгоритма.

### Особенности линейного контрастирования

Линейное контрастирование выполняется независимо для каждого канала. Оно происходит в 3 этапа:

1. Производится построение гистограммы яркости пикселей в отдельном цветовом канале;
2. Производится отсечение 2.5% пикселей с каждой стороны гистограммы, полученной на предыдущем этапе;
3. Определяются новые максимум и минимум яркостей по полученной на предыдущем этапе гистограмме;
4. Производится линейное контрастирование канала путём линейного преобразования яркости пикселей

В силу дискретности яркостей пикселей изображения и невозможности отсечь лишь часть пикселей одной и той же яркости отсечь ровно 2,5 % пикселей с края гистограммы не представляется возможным. В силу этого было принято решение отсекать наибольшее возможное количество пикселей, но не более 2,5% пикселей.

В силу уже упомянутой дискретности яркостей пикселей новые значения яркостей округляются вниз к ближайшему целому.

### **Особенности поиска «ядер облачности»**

На этом этапе обработки производится поиск серых объектов, которые далее станут основой обучающей выборки для байесовского классификатора.

Будем считать объект серым, если пиксели, из которых он состоит, имеют серый цвет (далее «серые пиксели»). Пиксель считается серым пиксели, если отклонение яркости в каждом канале относительно средней яркости этого пикселя во всех каналах не превышает некоторый порог  $\delta$ . Данный порог выбирается с учётом физических особенностей человеческого зрения [3]. В этой конкретной реализации значение  $\delta$  вычисляется как 3% от максимальной яркости пикселя.

С технической точки зрения интерес несут не сами объекты, а яркости их составляющих пикселей. Поэтому в практической реализации строится битовая маска, определяющая, является ли конкретный пиксель изображения серым пиксели.

Чёрные пиксели (пиксели, яркость которых во всех каналах равна 0) искусственно не включаются в маску. Это сделано из соображения, что благодаря большой отражательной способности облако будет не темнее окружающих его объектов, а следовательно облако с нулевой яркостью невозможно отличить от окружения.

Поскольку вычисление каждого элемента маски происходит независимо, этот этап поддаётся распараллеливанию.

### **Особенности формирования обучающей выборки**

Чтобы удалить единичные шумовые пиксели к битовой маске, полученной на предыдущем этапе, применяются операции эрозии и дилатации.

Край облачности может иметь цвет, отличный от серого, в силу возникновения на высотных объектах (которыми облака и являются) стереоэффекта. Для повышения точности обучающей выборки производится расширение выделенной области на 4 пикселя во все стороны.

Радиус расширения выделенной области необходимо выбирать с учетом того, что увеличение радиуса может привести к появлению необлачных областей, классифицированных как облака.

### **Особенности реализации байесовского классификатора**

Применение байесовского классификатора к одному из каналов позволяет выделить части облака, не попавшие в выборку на втором этапе, а также отсеять серые пиксели, не относящиеся к облачности.

На данном этапе было решено применить наивный байесовский классификатор со сглаживанием Лапласа. Коэффициент альфа при этом был выбран равным единице. Все пиксели делились на 2 категории: «облако» ( $A$ ) и «не облако» ( $B$ ). Таким образом, формула вероятности принадлежности пикселя с яркостью  $z$  к категории  $A$  принимала следующий вид:

$$p(z | A) = \frac{P(A | z)P(A)}{P(Z)} = \frac{(A_z + 1) |A|}{|A| + m} \frac{N}{N_z} = \frac{(A_z + 1) |A|}{|A| + m} \frac{|A|}{N_z},$$

где  $|A|$  — количество пикселей, классифицированных в обучающей выборке как облака;

$|A_z|$  — количество пикселей яркости  $z$ , классифицированных в обучающей выборке как облака;

$N$  — общее количество пикселей в обучающей выборке;

$N_z$  — общее количество пикселей яркости  $z$  в обучающей выборке

$m$  — количество возможных значений, которые может принимать яркость пикселя в канале.

Для множества  $B$  формулы аналогичны.

Пиксель считается принадлежащим множеству  $|A|$ , если  $P(z | A) \geq P(z | B)$ .

При вычислении используются следующие оптимизации:

1. Не выполняется деление на  $N_z$ , поскольку этот коэффициент является постоянным для обеих формул и может быть сокращён при сравнении;
2. Часть формулы, не зависящая от  $z$ , выделяется в отдельный коэффициент и вычисляется заранее один раз, что позволяет сократить количество вычислений;
3. Вместо вычислений для каждого пикселя изображения производится вычисление результата сравнения для всех возможных значений  $z$ . Для изображений, использующих для хранения яркости пикселя 16 бит на пиксель или менее, это позволяет значительно сократить ресурсы, поскольку подавляющее большинство обрабатываемых изображений имеют размер больше, чем 256\*256 пикселей.

Таким образом, формула для множества  $A$  принимает следующий вид:

$$\nu_A(z) = (A_z + 1)k_A,$$

$$k_A = \frac{|A|}{|A| + m}.$$

Аналогично для категории  $B$ . При этом условие принимает следующий вид:

$$\nu_A(z) \geq \nu_B(z).$$

В целях повышения точности расчёта множества  $A$  и  $B$  в совокупности охватывают не все пиксели изображения, поскольку из них предварительно исключаются пиксели нулевой яркости. Для этого их количество в каждой категории вычитается из размеров этой категории. Таким образом, имеет место следующее уравнение:

$$|A| + |B| + N_0 = S,$$

где  $S$  – размер изображения.

Поскольку вычисление результата значения для каждого значения  $z$  является независимой операцией, эта задача легко поддаётся распараллеливанию.

Результатом этого этапа вычислений является составленная для одного канала уточнённая маска облачности, в которой каждый пиксель выделен тогда и только тогда, когда для

его яркости  $z_i$  выполняется условие  $v_A(z_i) \geq v_B(z_i)$ . При этом пиксели с  $z_i = 0$  принудительно отмечаются не облачными.

### Особенности реализации векторизации

В качестве алгоритма векторизации был выбран алгоритм трассировки квадратов в направлении по часовой стрелке [2]. Результатом работы алгоритма является набор контуров.

Для целей векторизации строится матрица, каждый элемент которой отображает принадлежность соответствующего элемента маски конкретному контуру. Изначально матрица заполнена нулями.

Маска сканируется слева направо сверху вниз. При обнаружении в маске выделенного элемента, счётчик контуров увеличивается на один. С этого элемента начинается векторизация контура, при этом его номером считается новое значение счётчика контуров. В процессе векторизации один за другим просматриваются элементы маски, принадлежащие контуру, и в соответствующие им элементы матрицы записывается номер контура. Если в процессе векторизации контура произойдёт пересечение с другим контуром (значение матрицы для соответствующего элемента маски будет отлично от нуля и от номера векторизуемого контура), такой контур не добавляется в список векторизованных контуров.

Результат алгоритма может быть представлен в двух видах:

1. в виде сформированной матрицы, отражающей принадлежность соответствующего элемента маски к контуру с занулением элементов, не добавленных в список векторизованных контуров или без такового. При этом рекомендуется хранить информацию о левом верхнем и правом нижнем углах прямоугольника, ограничивающего контур, для уменьшения области поиска впоследствии;
2. в виде множества контуров, при этом контур представляет собой множество точек.

### Особенности реализации оценки площади контура

Посчитать площадь ограниченной вектором области можно прямо в процессе векторизации. Для этого применяется следующий алгоритм:

1. вместе с контуром хранится информации о том, к области какого внешнего контура принадлежит векторизуемый контур. Изначально в качестве такой информации записан номер самого контура (контур считается внешним сам себе). Если в процессе векторизации этого контура происходит пересечение с некоторым другим контуром, то для векторизуемого контура туда записывается то же значение, что находится в этом поле у контура, с которым произошло пересечение;
2. по окончании векторизации (успешной или нет) длина контура добавляется к площади того внешнего контура, в область которого входит векторизуемый контур. (Векторизация контура считается успешной, если не произошло пересечения с другим контуром.)

Таким образом легко получить площадь контура в пикселях. На основе разрешающей способности изображения, производится сравнение полученной площади с минимальной площадью высококучевых облаков  $S_{\min} = 10m^2$  [1].

### Особенности фильтрации по высоте

В случае, когда в качестве облаков выделены пиксели канала с одной единственной яркостью, коэффициент корреляции Пирсона, предложенный в статье как мера корреляции контуров, найти невозможно, поскольку дисперсия равна нулю. В связи с этим было решено использовать функцию ковариации вместо этого.

### Пример результата работы алгоритма

Результат работы представленного алгоритма на 4-канальном спутниковом снимке (рис. 1), представлен на рисунке 2.

#### *Достоинства и недостатки алгоритма*

Достоинства алгоритма:

1. Вычислительная простота алгоритма позволяет применять его для обработки больших по объему данных изображений;
2. Возможность достаточно точно выделить край облаков на снимках высокого пространственного разрешения, для которых использование нейросетевых методов затруднено;
3. Алгоритм не требует настройки, что позволяет производить обработку изображений в автоматическом режиме, без участия оператора.

Недостатки алгоритма:

1. Алгоритм может пропускать небольшие облака, для которых ядра облачности (пункт 2 описания алгоритма) отсутствуют или слишком малы;
2. В силу предыдущего пункта алгоритм не способен выделять облака низкой плотности, поскольку цвет лежащей ниже местности значительно влияет на цвет пикселей таких облаков;
3. Не подходит для панхроматических изображений в силу отсутствия на них стереоэффекта;
4. Отражающая способность водяного пара для длин волн анализируемых каналов должна быть примерно одинаковой.

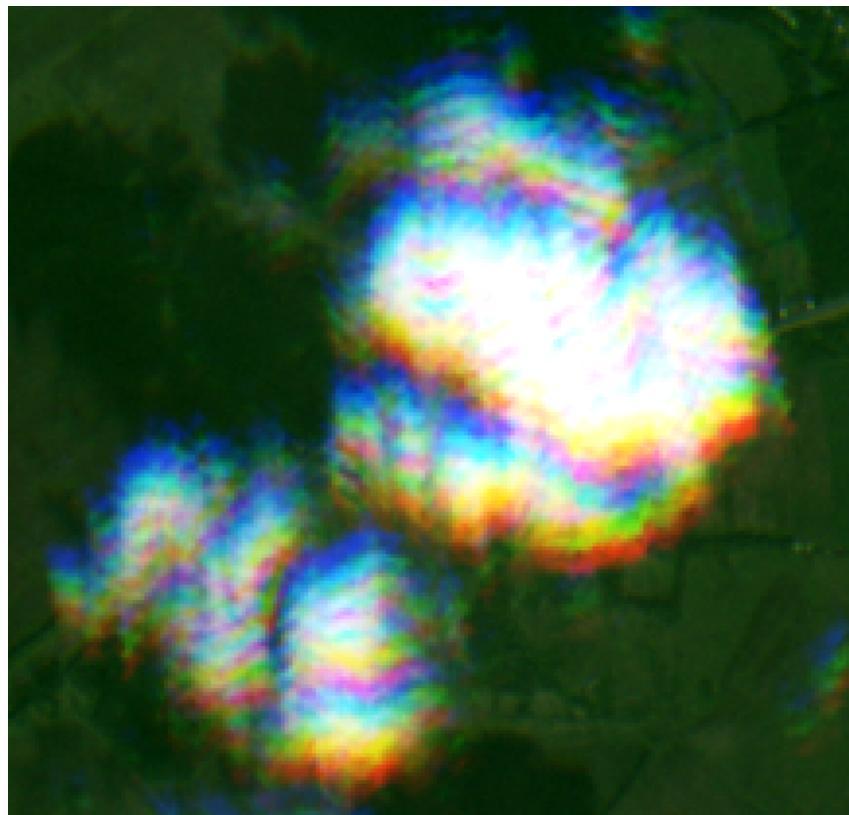


Рис. 1. Исходный снимок (фрагмент)

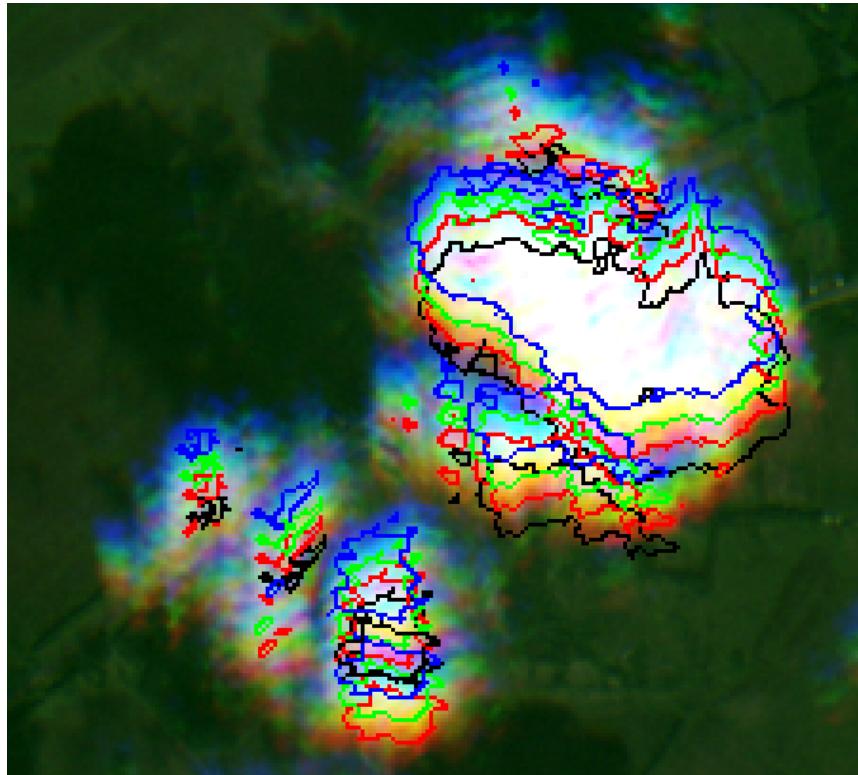


Рис. 2. Результат работы (фрагмент)

### Библиографический список

1. Автоматическая сегментация облачных объектов на снимках земной поверхности высокого пространственного разрешения - Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
2. Square Tracing Algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[https://www.imageprocessingplace.com/downloads\\_V3/root\\_downloads/tutorials/contour\\_tracing\\_Abeer\\_George\\_Ghuneim/square.html](https://www.imageprocessingplace.com/downloads_V3/root_downloads/tutorials/contour_tracing_Abeer_George_Ghuneim/square.html) (дата обращения: 12.10.2024).
3. Злобин В.К., Кочергин А.М. Алгоритмы и технологии предварительной обработки изображений в системах каталогизации данных дистанционного зондирования ЗЕМЛИ ISSN 1995-4565. Вестник РГРТУ. Вып. 23. Рязань, 2008 УДК 004.932

УДК 004.93'1; ГРНТИ 28.23.15

## ИНТЕГРАЦИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И ВИЗУАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

В.Е. Пасичняк, А.Н. Колесенков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kroc@ mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются методы распознавания эмоций человека по мимике лица, объединяя визуальные и физиологические подходы. Визуальный подход, основанный на системе кодирования лицевых движений (FACS), анализирует ключевые точки на лице для определения эмоций. Физиологический подход исследует термографию лица, фотоплетизмографию, ширину зрачка и частоту дыхания для получения дополнительной информации об эмоциональном состоянии. В статье обсуждаются преимущества и недостатки каждого метода, а также их потенциальное применение в медицине, рекламе и других областях. Особое внимание уделяется сложности интерпретации физиологических данных и влиянию внешних факторов на результаты.

**Ключевые слова:** обработка изображений, распознавание, эмоция, мимика, физиогномика, фотоплетизмография, термография, лицо.

## INTEGRATION OF PHYSIOLOGICAL AND VISUAL DATA TO IMPROVE THE ACCURACY OF DETERMINING EMOTIONAL STATES

V.E. Pasichnyak, A.N. Kolesenkov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, kpoed@mail.ru

*The summary.* This article discusses methods for recognizing human emotions by facial expressions, combining visual and physiological approaches. A visual approach based on the Facial Motion Coding System (FACS) analyzes key points on the face to identify emotions. The physiological approach examines facial thermography, photoplethysmography, pupil width, and respiratory rate to obtain additional information about the emotional state. The article discusses the advantages and disadvantages of each method, as well as their potential application in medicine, advertising, and other fields. Special attention is paid to the complexity of interpreting physiological data and the influence of external factors on the results.

*Keywords:* image processing, recognition, emotion, facial expressions, physiognomy, photoplethysmography, thermography, face.

Распознавание эмоций человека по мимике его лица является важной научно-исследовательской проблемой, которая охватывает множество областей и дисциплин, такие как компьютерное зрение, искусственный интеллект, медицина, психология и безопасность. Данная задача найдет свое применение во многих как бытовых, так и профессиональных задачах. Например, в использовании для таргетированной рекламы для использования в социальных сетях или для использования в медицине.

Задача может решаться несколькими подходами к определению эмоций: визуальным и физиологическим. Если говорить о визуальных подходах к определению эмоций по лицу человека, то стоит учитывать такие направления как физиогномика и ключевые точки на лице. Когда мы говорим о физиологических показателях для выяснения эмоций, то мы можем изучать такие показатели как термография лица или частота дыхания человека, также можно учитывать ширину зрачка испытуемого.

### Визуальный подход к определению эмоций

Визуальный подход к определению эмоций в первую очередь основан на трудах Карла-Германа Хьортсёй которая в последствии была принята и опубликована Полом Экманом и Уоллесом В. Фризеном в 1978 году. Данная система носит название система кодирования мимических движений (FACS) [1].

Мимика - комплексы движений мускулатуры лица, отражающие какое-либо психическое состояние, настроение, эмоцию [2].

Важным аспектом данного метода является использование видеоизображения лица человека для определения своего рода единиц действия, которые были закодированы заранее.

Принцип действия данного метода:

- первым делом мы должны получить изображение;
- следующим шагом стоит удалить лишние шумы с изображения которые могут помешать в определении эмоций;
- выделяем лицо на полученном изображении;
- после выделения лица, нам следует выделить ключевые точки, которые часто меняются при изменении в эмоциональном состоянии;
- последним шагом является классификация эмоций по системе кодирования мимических движений.

Используя данные методы, мы можем определить два вида улыбок, искреннюю и наигранную или же не настоящую.

Используя минимальные данные, полученные с помощью рта и бровей, мы можем определить основные эмоции, например при удивлении наши брови поднимаются, а рот открывается. Если человек испытывает отвращение, то наши брови снижаются, а рот поднимается, но концы рта опускаются. С помощью данного метода мы можем определить эмоции человека, но существует множество недостатков.

Клиническое применение:

- полученные данные могут быть использованы для оценки эффективности лечения и контроля состояния пациента, а также определения боли у пациентов, которые не могут говорить;
- также данные методы могут использоваться для определения депрессии у пациентов.

К достоинствам данного метода можно отнести в первую очередь неинвазивность, так как данный метод использует камеру, также мы можем отнести к преимуществам обеспечение дополнительной информации, что в дополнении к изменениям в мимике может нарисовать нам более полную картину. Еще должны учитывать, что данный метод может использоваться дистанционно, что является преимуществом для пациентов находящихся далеко от медицинских учреждений.

К недостаткам же отнесем требования к освещению и рабочему пространству, что подразумевает собой стабильность съемки и определенные условия освещенности, что несколько ограничивает использование метода. Определенные физические показания каждого человека могут отличаться, что может привести к не столь достоверным данным. Актеры могут обмануть данную систему, так как они занимаются выражением определенных эмоций. Также некоторые заболевания мешают определять эмоции человека исключительно по ключевым точкам, например такие заболевания как паралич лицевого нерва. А также требования к оборудованию.

### **Физиологический подход к определению эмоций**

Термография лица – способ измерения и визуализации теплового и инфракрасного излучения, испускаемого всеми нагретыми телами. Для определения эмоций человека мы можем использовать фотоплетизмографию лица человека

Фотоплетизмография – метод регистрации оптической плотности ткани с помощью фотоэлектрического плеизмографа; применяется с целью изучения отдельных характеристик регионального кровообращения, спектральных свойств крови, протекающей через изучаемый участок тела.

Принцип работы: Фотоплетизмография измеряет изменения в объеме кровеносных сосудов путем использования светоизлучающего датчика, который освещает ткани и регистрирует отраженный свет [3].

Использование в медицине: Этот метод может быть использован для определения приливов и отливов крови к лицу человека. Изменение количества крови в определенных участках лица могут нам сообщить об испытываемых эмоциях.

Метод использования: Данный метод можно обучить на основе изображений лиц нескольких человек при эмоционально вызывающих стимулах, таких как прослушивание музыки просмотре видео и так далее.

Фотоплетизмография с видеоизображения головы — это метод измерения изменений объема периферических сосудов, который основан на изменениях поглощения света тканями. Этот метод широко применяется в медицине и технике, для измерения пульса, уровня кислорода в крови и других параметров [4].

Индекс пульсации можно вычислить с помощью формулы  $PI = (S_{max} - D_{max}) / M$ ,

где  $PI$  – индекс пульсации, характеризующий циркуляторное сопротивление в бассейне локализуемой артерии;

$S_{max}$  – максимальная систолическая амплитуда, отражающая наибольшую систолическую скорость кровотока в точке локации;

$D_{max}$  – максимальный диастолический пик, отражающий максимальную диастолическую скорость в данной точке;

$M$  – средняя скорость кровотока в точке локации.

Также в фотоплетизографии используются следующие формулы:

Индекс дыхания:

$$DI = \frac{AC}{DC},$$

где  $AC$  – амплитуда изменения частоты сердечных сокращений,  $DC$  – амплитуда изменения амплитуды фотоплетизографии.

Индекс активности:

$$AI = \frac{AC * DC}{FC}.$$

где  $FC$  – общая амплитуда фотоплетизографии.

Индекс респирации:

$$RI = \frac{DI}{AI}.$$

К достоинствам данного метода можно отнести:

- Простота применения: фотоплетизография — это непростой инструмент, и ее можно использовать с мобильными устройствами, такими как смартфоны и умные часы, чтобы получить данные о пульсе и уровне кислорода в крови.
- Безопасность: фотоплетизография неинвазивна и не требует введения каких-либо инъекций или проникновения в тело, что делает ее безопасной и малоинвазивной техникой.

К недостаткам же следует отнести:

- Ограниченность данных: фотоплетизография предоставляет ограниченное количество данных и может иметь ограниченную точность в сравнении с более сложными и инвазивными методами, такими как артериальная катетеризация.
- Влияние внешних факторов: результаты могут быть искажены влиянием различных внешних факторов, таких как освещенность, движение и поза тела.
- Точность измерений: требует точной калибровки и учета физиологических особенностей каждого человека для достижения достоверных результатов.

Изучение ширины зрачка также может помочь нам придать дополнительную точность в изучении эмоций человека. Данный феномен носит название зрачковый рефлекс возбуждения. Для данного метода существуют определенные правила. Но по ширине зрачков, без других данных мы не сможем определить эмоции человека, так как часто одна реакция зрачка, может вызываться несколькими противоречивыми эмоциями.

Как правило, скука или расслабление приводят к сужению зрачков. В то время как к расширению зрачков приводят как положительные, так и отрицательные эмоции, но конечно причины разные [5]. Так, например:

Расширение зрачков часто ассоциируется с интересом, вниманием, возбуждением, предвкушением, удовольствием и даже сексуальным возбуждением. Когда мы видим что-то, что нам нравится или что нас интересует, наши зрачки непроизвольно расширяются.

Расширение зрачков также может происходить при страхе, тревоге, стрессе, удивлении и боли. Это связано с тем, что тело готовится к потенциальной угрозе, увеличивая приток информации к мозгу.

Также при определении эмоций мы можем обратить на изменение в дыхании человека. Так например:

- Частота дыхания увеличивается при тревоге, страхе, возбуждении и замедляется при спокойствии и расслаблении.
- Глубина дыхания также подвержена изменению. При спокойствии оно становится более глубоким и медленным, а при страхе и тревоге оно становится более частым и поверхностным.

Таким образом, мы можем увидеть, что физиологические методы определения эмоций человека не могут достигать достаточной точности при выявлении эмоций испытуемого, в то время как визуальные методы подвержены сознательной мимики пациентов. Но если мы можем объединить данные методы, тогда мы сможем повысить точность определения эмоций человека, так как физиологические реакции организма сложнее подделать, чем такие изменения как поднятие кончиков рта. Но стоит учитывать, что даже в таком случае могут возникать неточности, которые могут быть связаны с индивидуальными показателями организма человека.

### Библиографический список

1. Мажит, А. Н. Детектирование лиц и распознавание эмоций с использованием алгоритмов компьютерного зрения / А. Н. Мажит // Вестник науки. – 2024. – Т. 3, № 12(81). – С. 1446-1451.
2. Пасичняк В.Е. Методика оценки частоты сердечных сокращений по видеоряду. – Рязань: Сборник СТНО-2024 – Том 4. С. 202-206.
3. Мельник, О. В. Распознавание микровыражений лица с использованием классификаторов на основе методов машинного обучения / О. В. Мельник, В. А. Саблина, А. Д. Черненко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 1(45). – С. 125-135.
4. Колесенков, А. Н. Метод повышения качества цифровых изображений с произвольным увеличением их разрешения / А. Н. Колесенков, Б. В. Костров, Д. В. Фетисов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2020. – Т. 9, № 4(52). – С. 20-24.
5. Шаповал, Ж. Я. Распознавание эмоций человека по изображению как часть автоматизированного переводчика языка жестов / Ж. Я. Шаповал // Молодежный научно-технический вестник. – 2017. – № 7. – С. 55.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.35

## АЛГОРИТМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИХ СОВМЕЩЕНИЯ

Д.С. Чубаров, О.А. Бодров, А.Э. Москвитин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, cubarry@gmail.com

**Аннотация.** В работе разработан алгоритм совмещения спутниковых изображений в видимом и ИК-диапазоне. Рассмотрены основные этапы работы алгоритма. Более подробно анализируются процессы масштабирования изображений, их интерполяция, а также вычисление корреляции между двумя снимками.

**Ключевые слова:** Инфракрасный диапазон (ИК-диапазон), интерполяция изображений, корреляция.

## ALGORITHM FOR GEOMETRIC CORRECTION OF SATELLITE IMAGES TO IMPROVE THE ACCURACY OF THEIR ALIGNMENT

D.S. Chubarov, O.A. Bodrov, A.E. Moskvitin

Ryazan State Radio Engineering University na med after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, cubarry@gmail.com

**The summary.** The paper considers the algorithm for combining satellite images in the visible and IR range. The main stages of the algorithm are considered. The processes of image scaling, their interpolation and calculation of the correlation between two images are considered in more detail.

**Keywords:** Infrared range, image interpolation, correlation.

Геостационарные спутники земли снимают землю в видимом и тепловом диапазоне спектра. В видимом диапазоне они позволяют наблюдать облачные структуры, атмосферные

фронты, штормы и другие метеорологические явления, определять структуру и границы различных объектов, в том числе ледников и водоёмов. Однако изображения в видимом диапазоне имеют недостатки – зависимость от солнечного света и погодных условий. Тепловой диапазон, в свою очередь, позволяет спутникам измерять температуру поверхности Земли и облаков, а также фиксировать тепловое излучение, которое Земля излучает ночью. Сочетание видимого и теплового диапазона позволяет получить более полное представление о состоянии атмосферы и поверхности Земли [1].

Задача совмещения спутниковых изображений, полученных в различных диапазонах спектра, представляет собой важный этап в обработке данных дистанционного зондирования Земли [2]. Изображения, полученные в ИК-диапазоне, имеют гораздо более низкое разрешение, чем в видимом, такая разница в разрешении создает значительные трудности при совместном анализе этих изображений [3]. Одной из ключевых проблем является то, что на различных снимках Земля занимает разный процент от общей площади изображения. Это означает, что для эффективного совмещения изображений необходимо провести процесс выравнивания, который включает в себя точную настройку масштаба одного из изображений таким образом, чтобы при наложении границы поверхности планеты на снимках совпадали идеально.

Для решения поставленной задачи предлагается алгоритм, который на каждом цикле работы масштабирует инфракрасное изображение с использованием методов интерполяции, что обеспечивает плавное увеличение снимка и минимизацию потерь информации. Для дальнейшей работы необходимо привести оба снимка к единому размеру, для чего к меньшему снимку равномерно добавляется необходимое количество пикселей. После приведения снимков к унифицированному размеру между ними вычисляется коэффициент корреляции. Максимум коэффициента корреляции будет свидетельствовать о наилучшем масштабе инфракрасного изображения, который обеспечит наибольшее совпадение с изображением в видимом диапазоне.

Масштабирование изображений методами интерполяции представляет собой процесс изменения размера изображения, при котором для каждого нового пикселя вычисляется значение на основе окружающих пикселей из исходного изображения. Этот процесс применяется как для увеличения, так и для уменьшения изображения. Основная задача при этом заключается в корректном перераспределении данных исходного изображения на новую сетку пикселей, соответствующую измененному размеру.

Представим изображение как двумерную сетку, где каждый пиксель имеет определенное положение и значение. Если нужно изменить размер изображения, новая сетка пикселей может иметь другое количество строк и столбцов, а положение пикселей в ней чаще всего не совпадает с положением пикселей в исходной сетке [4]. Интерполяция помогает определить, каким должно быть значение каждого пикселя в новой сетке, основываясь на значениях ближайших к нему пикселей в исходной сетке. В данной работе рассматривается билинейная интерполяция. Когда масштабируется изображение, для каждого нового пикселя на выходе (с индексами  $i$  и  $j$ ) необходимо вычислить его координаты в исходном изображении. Вычисление координат в исходном изображении осуществляется по формулам:

$$x = \text{round}(i * \text{size}), \quad y = \text{round}(j * \text{size}),$$

где  $x$  и  $y$  – это дробные координаты в исходном изображении, которые могут быть нецелыми,  $\text{size}$  – коэффициент масштабирования,  $i$  и  $j$  - координаты нового изображения.

Значение нового пикселя рассчитывается с учетом четырех ближайших пикселей исходного изображения. Координаты этих пикселей находим по формулам:

$$x_0 = \lfloor x \rfloor, \quad y_0 = \lfloor y \rfloor,$$

где  $x$  и  $y$  — это операции округления до ближайшего меньшего целого числа.

$$x_1 = \min(x_0 + 1, w - 1), \quad y_1 = \min(y_0 + 1, h - 1),$$

где  $w$  – ширина изображения,  $h$  – высота изображения.

Теперь, чтобы вычислить, как далеко новый пиксель находится от ближайших пикселей в исходном изображении, рассчитываем дробные смещения  $dx$  и  $dy$ :

$$dx = x - x_0, \quad dy = y - y_0,$$

где  $dx$  — это смещение по оси  $X$  (горизонтальное), а  $dy$  — это смещение по оси  $Y$  (вертикальное).

Далее вычислим два промежуточных значения по горизонтали:

$$\begin{aligned} I_0 &= I(x_0, y_0) * (1 - dx) + I(x_1, y_0) * dx, \\ I_1 &= I(x_0, y_1) * (1 - dx) + I(x_1, y_1) * dx, \end{aligned}$$

где —  $I(x_0, y_0), I(x_1, y_0), I(x_0, y_1), I(x_1, y_1)$  — это значения пикселей исходного изображения в соответствующих точках.

Теперь, имея  $I_0$  и  $I_1$ , вычисляем итоговое значение нового пикселя с учетом вертикального смещения  $dy$ :

$$I(i, j) = I_0 * (1 - dy) + I_1 * dy,$$

Это финальная формула для билинейной интерполяции, где  $I(i, j)$  — значение пикселя в новом изображении.

Для выполнения корреляционного анализа изображений необходимо, чтобы оба изображения имели одинаковые размеры, поскольку операция корреляции основывается на пиксельных значениях, которые должны быть сопоставимы между двумя изображениями.

Стоит отметить, что исходное изображение должно быть пропорционально результирующему, чтобы оно не теряло своих пространственных характеристик и неискажалось. Размеры меньшего изображения увеличиваются таким образом, чтобы оно занимало центральное положение в новой матрице большего изображения, при этом важно, чтобы все элементы меньшего изображения оставались в исходном расположении относительно увеличенной области. Для увеличения размеров изображения пространство вокруг снимка дополняется пикселями черного цвета. Дополнительные пиксели, добавленные по краям изображения, не несут полезной информации, поскольку они не соответствуют никакому объекту или характеристике, но служат для выравнивания размеров изображений.

Корреляция изображений — это процесс количественного определения степени сходства между двумя изображениями. В данном случае она используется для нахождения масштаба, при котором границы поверхности Земли на инфракрасном снимке максимально совпадают с видимым изображением. Для этих целей используется коэффициент корреляции Пирсона, он является одним из самых популярных статистических инструментов для оценки линейной зависимости между двумя количественными переменными. Основная идея коэффициента Пирсона заключается в сравнении изменения двух переменных относительно их средних значений. Он рассчитывается как отношение ковариации двух переменных к произведению их стандартных отклонений. В результате такой нормализации получаем безразмерный коэффициент, который находится в диапазоне от -1 до 1. Коэффициент равный 1, говорит о том, что между пикселями существует идеальная положительная линейная зависимость. Значение -1 указывает на идеальную отрицательную линейную зависимость. Если коэффициент равен 0, то линейная связь между пикселями отсутствует. Однако важно понимать, что  $r = 0$  не исключает возможность существования нелинейной зависимости между переменными. Для расчета коэффициента корреляции Пирсона используется следующая формула [1]:

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{j=0}^n (y_j - \bar{y})^2}},$$

где  $x_i$  и  $y_i$  — значения переменных  $X$  и  $Y$  соответственно,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  — средние значения переменных  $X$  и  $Y$ .

В числителе формулы вычисляется ковариация, которая отражает степень совместной изменчивости двух переменных. Знаменатель представляет собой произведение стандартных отклонений каждой из переменных, что делает результат нормированным и позволяет сравнивать разные наборы данных.

Поскольку корреляция Пирсона отражает линейную зависимость между значениями пикселей на двух изображениях, максимальное значение коэффициента указывает на наиболее точное совмещение, минимизируя искажения и улучшая качество анализа спутниковых данных.

Для сравнения предложенного алгоритма с существующими методами целесообразно воспользоваться алгоритмом геометрического совмещения разновременных спектрозональных изображений [5]. Этот метод использует итеративный подход, он основан на геодезической привязке пикселей и аппроксимации функций обратного геодезического преобразования, в результате чего метод требует сложных геодезических преобразований. В отличие от него предлагаемый новый алгоритм фокусируется на простой и эффективной операции масштабирования, что делает его более подходящим для задач точного совмещения изображений дисков Земли. Таким образом, предложенный алгоритм работает значительно быстрее для конкретной задачи благодаря своей специализации и оптимизации под специфические условия обработки снимков.

### **Библиографический список**

1. Мятов Г. Н., Тишкун Р. В., Ушенкин В. А., Юдаков А. А. Применение нечетких мер подобия в задаче совмещения изображений поверхности земли // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина – 2013
2. Еремеев В. В., Егошкин Н. А., Макаренков А. А., Москвитин А. Э., Ушенкин В. А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки земли // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета – 2017, учредитель: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
3. Кузнецов А. Е., Светелкин П. Н. Оперативное совмещение спектрозональных изображений при цветосинтезе // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина – 2007
4. Еремеев В. В. Методы и информационные технологии межотраслевой обработки многозональных космических изображений. – Рязань: РГРТА, 1997.
5. Антонушкина С.В., Гуров В.С.. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Зенин В.А., Князьев П.А., Козлов Е.П., Кузнецов А.Е., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Побаруев В.И., Пошехонов В.И., Пресняков О.А., Светелкин П.Н., Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015.

УДК 004; ГРНТИ 89.15.71

## **АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА НА МОЗАИЧНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ С ВЫРАВНИВАНИЕМ ЯРКОСТИ**

**А.В. Соловьев, В.М. Архипкин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, arhipkin.v.m@edu-rsreu.ru*

**Аннотация.** В работе рассматривается алгоритм обнаружения облаков на спутниковых снимках. Описаны основные проблемы, возникающие при анализе таких изображений, включая неоднородность освещения и влияние облачного покрова. Предложен алгоритм коррекции яркости на основе концентрических колец, позволяющий устранить перепады освещения. Рассмотрена пороговая бинарная сегментация облаков, включая принципы выбора оптимального порога. Приведены основные этапы обработки изображений, их математическое описание, а также особенности предложенного метода. Рассмотрены преимущества и ограничения подхода, а также возможные направления его дальнейшего развития.

*Ключевые слова:* спутниковые снимки, обработка изображений, выравнивание яркости, концентрические кольца, бинарная сегментация облаков.

## ALGORITHM FOR CLOUD COVER DETECTION ON MOSAIC SATELLITE IMAGES WITH BRIGHTNESS EQUALIZATION

A.V. Soloviev, V.M. Arkhipkin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, arhipkin.v.m@edu-rsreu.ru

*The summary.* This paper presents an algorithm for detecting clouds in satellite images. The main problems associated with satellite image analysis, including uneven illumination and the impact of cloud cover, are described. A brightness correction algorithm based on concentric rings is proposed to eliminate illumination variations. The threshold-based binary segmentation approach is discussed, along with the principles for selecting the optimal threshold. The key stages of image processing are presented, as well as the mathematical descriptions and specific features of the proposed method. The advantages and limitations of this approach are outlined, along with suggestions for further improvement.

*Keywords:* satellite images, image processing, brightness alignment, concentric rings, binary cloud segmentation.

Обработка спутниковых снимков играет ключевую роль в анализе земной поверхности. Для повышения качества обработки снимков, может потребоваться выровнить яркость и провести сегментацию облачного покрова.

После удаления облаков повышается точность обработки спутниковых снимков и интерпретации объектов интереса на них.

Для обработки часто необходимо использовать несколько изображений, полученных в разное время. Для этого их объединяют в единый снимок (составное изображение). Отличительной особенностью этих изображений, в первую очередь, являются различные условия освещенности земной поверхности. В связи с этим перед сегментацией облачности ставится задача выровнять яркости отдельных частей составного изображения.

Рассматривается алгоритм обнаружения облаков, включающий два подэтапа:

1) выравнивание яркости для устранения неоднородности освещения, вызванных различиями условий во времени съемки;

2) сегментация облаков, применяемая к скорректированному изображению.

Для устранения проблемы с неравномерным распределением яркости применяются следующие методы:

а) глобальное гистограммное выравнивание – классический метод, позволяющий выровнить распределение яркости по всему изображению.

Этот метод эффективно перераспределяет интенсивности пикселей по всему изображению, но при этом он не учитывает локальные особенности освещения. В случае составного спутникового снимка, где разница яркости между сегментами значительна, этот метод может привести к потере деталей и усилению шумов.

б) адаптивное гистограммное выравнивание (Adaptive Histogram Equalization, АНЕ и CLAHE) – улучшенная версия глобального выравнивания, выполняемая в локальных окнах изображения.

Работает в локальных областях, устранивая глобальный дисбаланс, но создает артефакты на границах окон обработки.

При обработке изображения, где градиент яркости проходит по диагонали, может привести к неравномерному выравниванию.

в) методы на основе полиномиальной аппроксимации – вычитание или нормализация фона с использованием полиномиальных функций.

Полиномиальная нормализация хорошо подходит для равномерного градиента яркости, но не справляется с резкими перепадами на швах составных снимков.

В случае диагонального изменения освещения сложность аппроксимации возрастает, что может привести к неточным корректировкам.

г) методы машинного обучения (CNN, GAN) – более современные подходы, использующие нейросетевые архитектуры для коррекции освещения и устранения границ между сегментами изображения.

Современные модели глубокого обучения могут эффективно устранивать неоднородности освещения, но требуют большого количества размеченных данных для обучения.

В случае диагонального распределения яркости обученные модели могут давать некорректные результаты, если в данных отсутствуют аналогичные примеры.

В связи с наличием значительных перепадов яркости, черных областей и неравномерности освещения, присущих мозаичным спутниковым изображениям, несмотря на эффективность представленных методов, для решения задачи был выбран подход на основе концентрических колец, который более эффективно справляется с данными особенностями на изображениях.

Рассматриваемый алгоритм включает следующие этапы.

1. Определение центра на изображении размерами  $W \times H$ :

$$C_x = \frac{W}{2}, \quad C_y = \frac{H}{2}.$$

3. Исключение черных областей космического пространства посредством создания бинарной маски:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) > 0 \\ 0, & I(x, y) = 0 \end{cases}$$

Здесь  $I(x, y)$  - яркость пикселя в исходном изображении, а  $M(x, y)$  - маска, принимающая значение 1 для полезных пикселей.

3. Вычисление общей средней яркости, без учета черных областей:

$$B_{global} = \frac{\sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} I(x, y) \times M(x, y)}{\sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} M(x, y)}.$$

4. Разбиение изображения на  $N$  кольцевых областей, где для каждого кольца вычисляется его высота:

$$h_{ring} = \frac{\min(W, H)}{2N}$$

и границы:

$$R_{inner} = i \times h_{ring}, \quad R_{outer} = (i + 1) \times h_{ring},$$

Здесь  $i$  - номер кольца (от 0 до  $N - 1$ ).

5. Вычисление средней яркости кольца:

$$B_{ring, i} = \frac{\sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} I(x, y) \times M(x, y)}{\sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} M(x, y)}, \quad \forall (x, y) \in Ring_i$$

Здесь  $Ring_i$  - кольцо, для которого высчитывается средняя яркость.

6. Зная общую среднюю яркость изображения и среднюю яркость определенного кольца, вычисляется коэффициент нормализации:

$$\begin{cases} k_i = \frac{B_{global}}{B_{ring,i}}, & B_{ring,i} > 0 \\ k_i = 1, & B_{ring,i} \leq 0 \end{cases}$$

7. Коррекция интенсивности пикселей в каждом кольце:

$$I'(x, y) = \min(I(x, y) \times k_i, I_{max}).$$

Здесь  $I_{max}$  - максимальная интенсивность пикселя (для 16-битных изображений она равняется 65535).

Предложенный алгоритм уменьшает перепады яркости в спутниковых изображениях, отличается простотой реализации и эффективностью, но требует выбора оптимального количества колец и может быть неустойчив к локальным изменениям яркости внутри кольца.

Пример работы данного подхода представлен на рисунке 1.

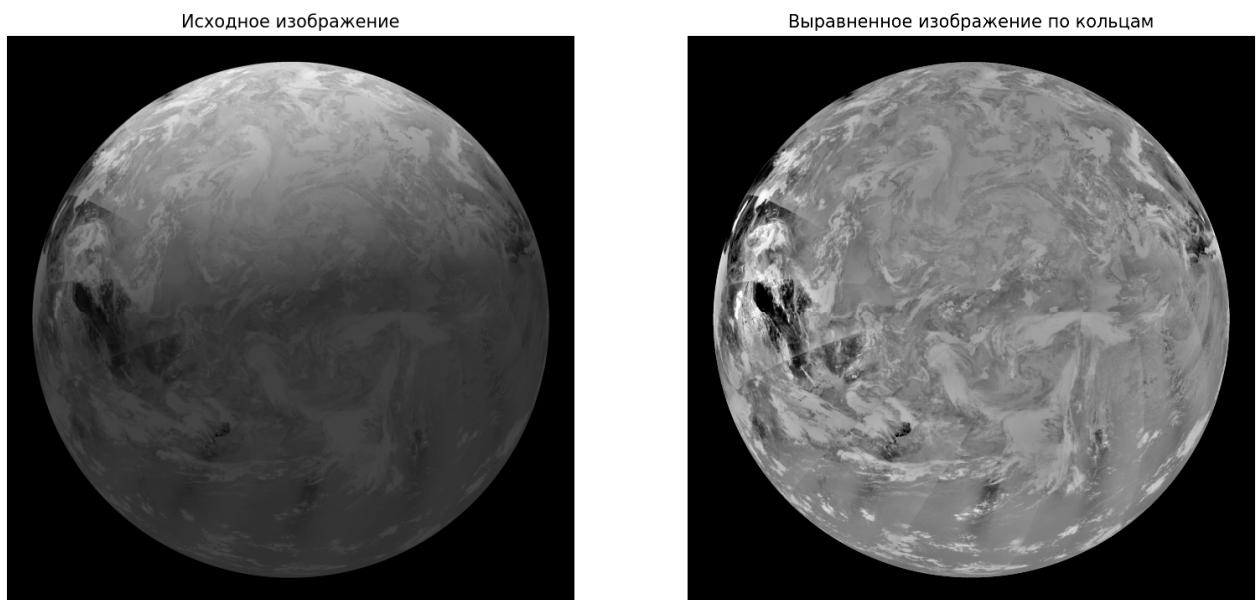


Рис. 1. Пример работы выравнивания яркости изображения

Для сегментации облаков был применен пороговый алгоритм, поскольку он показал наилучшие результаты в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и хорошую устойчивость к вариациям яркости.

Для бинарной сегментации используется порог, выше которого пиксели считаются облачными. В данной работе применяется значение порога  $T = 290$ .

Для каждого пикселя изображения  $I(x, y)$  после выравнивания яркости строится бинарная маска  $M(x, y)$ :

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) \geq T \\ 0, & I(x, y) < T \end{cases}$$

Здесь  $M(x, y) = 1$  — пиксель принадлежит облаку.  $M(x, y) = 0$  — пиксель относится к подстилающей поверхности или фону.

Полученный результат сегментации сохраняется в бинарном изображении, где белые области соответствуют облакам. Пример работы данного подхода представлен на рисунке 2.

Поскольку сегментация основана на фиксированных порогах, возможны ошибки:

- недосегментация (облака частично не выделены) при слишком высоком  $T$ ;
- пересегментация (ложное включение областей) при слишком низком  $T$ .

Оптимальное значение порога подбирается экспериментально.

Перспективными направлениями для дальнейших улучшений являются автоматизация выбора параметров, адаптивные методы сегментации и использование дополнительных спектральных каналов. Эти усовершенствования помогут повысить точность обработки спутниковых снимков и расширить их применение в мониторинге экосистем, сельском хозяйстве и картографии.

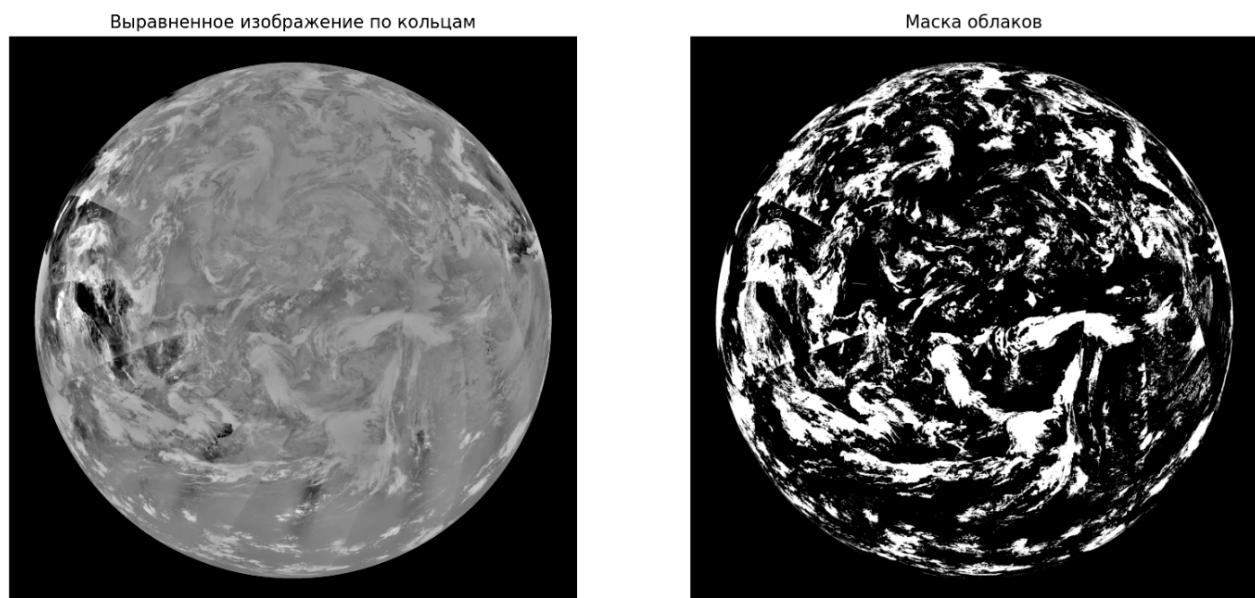


Рис. 2. Пример работы сегментации облаков

### Библиографический список

- Грошев, И.В. Системы технического зрения и обработка изображений / И.В. Грошев, В.И. Корольков // М.: РУДН, 2008.
- Тумаков, Д.Н. Алгоритмические методы сегментации изображений / Д.Н. Тумаков, З.Д. Каюмов, А.А. Егорчев, И.И. Латыпов // Казань: КФУ, 2023.
- Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // М.: Техносфера, 2005.
- Старовойтов, В.В. Получение и обработка изображений на ЭВМ / В.В. Старовойтов, Ю.И. Голуб // Минск: БНТУ, 2018.
- Носов, А.В. Сравнение алгоритмов выравнивания освещенности на изображении / А.В. Носов, Д.В. Бузанев, А.Г. Зотин // СибГУ, Красноярск, 2018.

УДК 004.7; ГРНТИ 49.38.49

## РАЗРАБОТКА ПЛАГИНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИ ПоТ ПРИ ЕГО ВНЕДРЕНИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

О.А. Бодров, М.С. Поборуева

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, imerm01@yandex.ru

**Аннотация.** Разработанное программное обеспечение позволит автоматизировать управление, учёт, а также взаимодействие пользователей с ПО. Одним из результатов работы системы станут рекомендации при проектировании структуры разрабатываемой модели.

**Ключевые слова:** промышленный интернет вещей, 1С, датчики.

## DEVELOPMENT OF A PLUG-IN FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE ПоТ MODEL WHEN IT IS IMPLEMENTED IN AN ENTERPRISE

O.A. Bodrov, M.S. Poborueva

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, imerm01@yandex.ru

**The summary.** The developed software will automate management, accounting, and user interaction with the software. One of the results of the system's work will be recommendations for designing the structure of the model being developed.

**Keywords:** industrial Internet of Things, 1C, sensors.

В настоящее время на многих предприятиях для автоматизации производства используется платформа 1С. В связи с этим в рамках разработки прикладного решения была выбрана система управления базами данных (СУБД), интегрированная в платформу «1С: Предприятие 8.3». Эта СУБД служит для хранения данных, отражающих текущую ситуацию в изучаемой области. Применяется механизм логического вывода, который позволяет формировать заключения на основе анализа входных данных как элементов определённых правил.

Так как схема типового решения для каждого предприятия может быть своя, необходимо разработать в программной среде модель схемы ПоТ. Для этого в программе предусмотрен механизм построения модели схемы типового решения. Так как 1С представляет возможность ввода новых данных без редактирования программного кода, то при необходимости использования на предприятии нескольких схем администратор по универсальной инструкции настраивает каждую из них под нужды подразделений [1].

Для согласования работы схемы, было разработано программное обеспечение (ПО) и созданы следующие справочники: Схемы типового решения, элементы сети, список датчиков, список действий, список пользователей, список подразделений, список выполнения работ сотрудниками, список учета данных пользователей, пользователи, подзадачи микроконтроллеров, виды микроконтроллеров, задачи микроконтроллеров. При необходимости внесения новых датчиков или схем, пользователь добавляет их вручную в справочники 1С: Предприятия (рис.1).

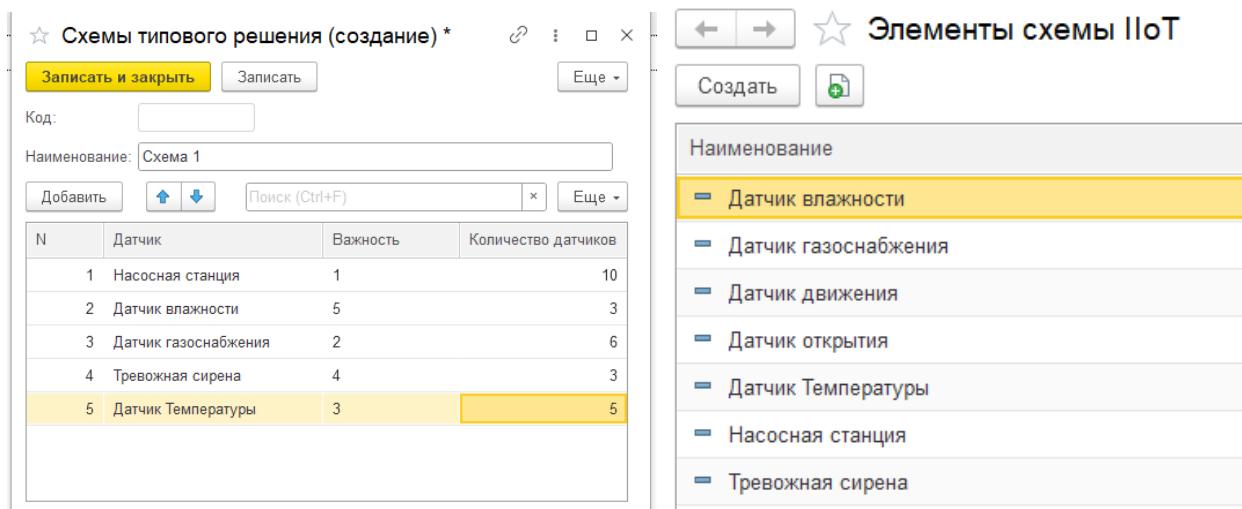


Рис. 1. Настройка схемы типового решения

Каждый датчик в зависимости от важности, их количества, входных характеристик (указываются в самом датчике) будет выполнять определенные задачи. Совместное использование групп датчиков предлагается разделять на микропроцессы с помощью микроконтроллеров.

Для реализации оценки эффективности внедрения технологии интернета вещей в интегрируемой системе был создан механизм под управлением платформы 1С. В разработанном ПО созданы такие элементы как пользователи, подразделения, задачи пользователей и подразделений, а также данные по датчикам, элементам сети, задачам микроконтроллеров и т.д.

Для организации работы в 1С предприятия введены следующие подсистемы, которые будут организованы в виде иерархической структуры. Таким образом, одна подсистема способна включать в себя несколько других подсистем [2]. Для ограничения взаимодействия различных подразделений между собой, были созданы различные роли. В контексте конфигурации роль может быть сопоставлена с должностями или видами деятельности различных групп пользователей, для обслуживания которых предназначено данное прикладное решение. На рисунке 2 предоставлены различные роли программного решения:

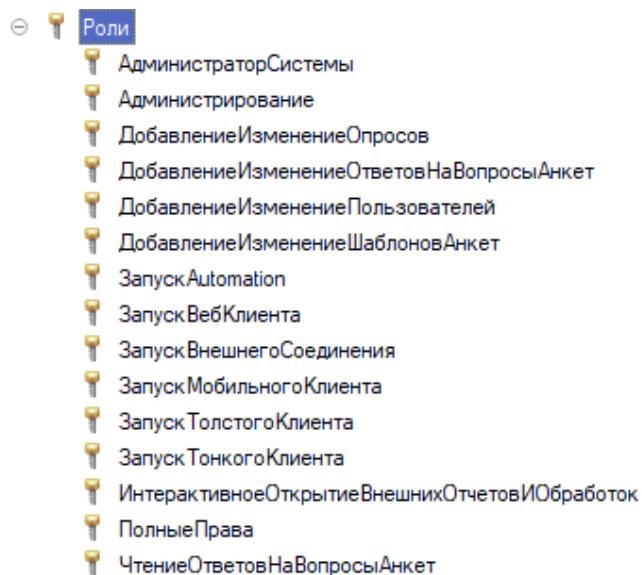
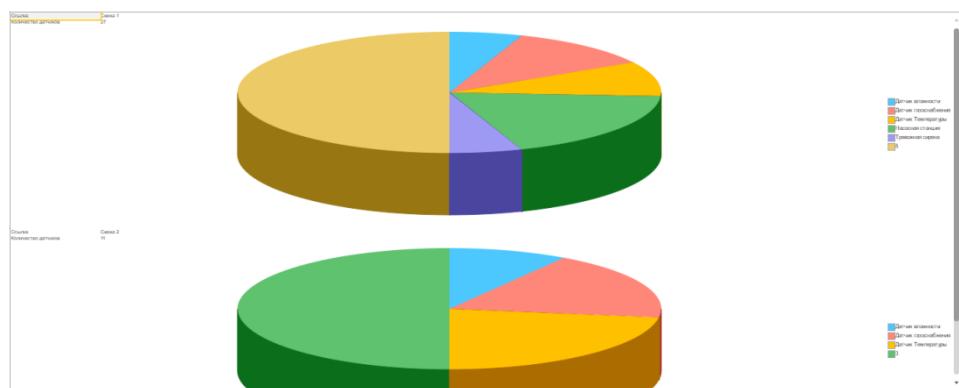


Рис. 2. Роли взаимодействия пользователей и подразделений

Конфигуратор предоставляет возможность создания разнообразных отчётов, которые удовлетворяют потребностям пользователей системы в точной и детализированной выходной информации. Кроме того, созданные отчеты показывают рентабельность использования настроенной схемы типового решения при внедрении ПoT [3].

Обычно для генерации выходных данных отчёты используют систему компоновки данных. Однако, в общем случае, отчёт может содержать произвольный алгоритм формирования как бумажного, так и электронного варианта на встроенным языке.

Отчёт может включать одну или несколько форм, позволяющих при необходимости ввести параметры, которые влияют на выполнение алгоритма. На рисунках 3 и 4 представлены примеры созданных отчетов.



Ссылка					Важность	Количество датчиков
Датчик	Код	Наименование	Номер строки	Пометка удаления		
<b>Схема 1</b>						
Насосная станция	000000001	Схема 1	1	Нет	5	<b>27</b>
Датчик газоснабжения	000000001	Схема 1	3	Нет		10
Датчик Температуры	000000001	Схема 1	5	Нет		6
Тревожная сирена	000000001	Схема 1	4	Нет		5
Датчик влажности	000000001	Схема 1	2	Нет		3
<b>Схема 2</b>						
Датчик Температуры	000000002	Схема 2	2	Нет	3	<b>11</b>
Датчик влажности	000000002	Схема 2	3	Нет		5
Датчик газоснабжения	000000002	Схема 2	1	Нет		2
<b>Итого</b>						
					8	<b>38</b>

Рис. 4. Отчет

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать управление, учёт, а также создать единую базу данных, содержащую информацию о взаимодействии пользователей с ПО. Одним из результатов работы системы станут рекомендации, при проектировании структуры разработки модели, для автоматизации работы подразделений.

### Библиографический список

1. Математическое и компьютерное моделирование процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях, Д. А. Перепелкин, Вестник РГРТУ. 2021, № 77
2. Разработка шлюза и облачной платформы программно конфигурируемой сети устройств Интернета вещей, Д. А. Перепелкин, Д. Д. Ткачев, Вестник РГРТУ. 2023, № 84
3. Модели и технологии построения защищенных сетей Интернета вещей, С. А. Лесько, Д. О. Жуков, П. Ю. Пушкин, Вестник РГРТУ. 2022, № 72

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА В ПРИЛОЖЕНИИ К МАРШРУТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРНЫХ ЗАДАЧ

А.О. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, andrey-popov03@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются точные и эвристические алгоритмы решения задачи коммивояжера. Реализованы метод ветвей и границ, алгоритм имитации отжига металла, жадный алгоритм, муравьиный алгоритм и генетический алгоритм. Проведен сравнительный анализ рассмотренных алгоритмов и выявлен наиболее эффективный для отдельных случаев.

**Ключевые слова:** задача коммивояжера, точные алгоритмы, эвристические алгоритмы.

## INVESTIGATION OF THE METHODS OF THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM IN APPLICATION TO ROUTE OPTIMIZATION OF TRAJECTORY TASKS

А.О. Пороп

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, andrey-popov03@mail.ru

**The summary.** The paper considers exact and heuristic algorithms for solving the traveling salesman problem. The method of branches and boundaries, an algorithm for simulating metal annealing, a greedy algorithm, an ant algorithm and a genetic algorithm are implemented. A comparative analysis of the considered algorithms has been carried out and the most effective one for individual cases has been identified..

**Keywords:** traveling salesman's problem, exact algorithms, heuristic algorithms.

В современном мире задача коммивояжера помогает оптимизировать работу беспилотного летательного аппарата, транспортных отделов и отделов логистики, упрощает работу почтовых и курьерских служб, повышает эффективность мониторинга объектов, а также лежит в основе работы устройства с ЧПУ. Задача оптимизации маршрутов и траекторий движения различных объектов приобретает все большую актуальность в связи с развитием перечисленных областей. Вследствие чего исследование методов решения задачи коммивояжера в контексте маршрутной оптимизации траекторных задач является важным направлением современной науки и техники, имеющим широкое практическое применение в различных областях промышленности и сферах деятельности человека.

Задача коммивояжера является одной из классических задач комбинаторной оптимизации в области теории графов и операционного исследования. Несмотря на свою кажущуюся простоту формулировки, она относится к классу NP-полных задач [1]. Данная задача заключается в следующем: дан набор городов и расстояния между каждым из пары городов, необходимо найти кратчайший маршрут, который начинается из одного города, посещает каждый город ровно один раз и возвращается в исходный город. Начальным условием для данной задачи является то, что коммивояжер должен пройти каждый город ровно по одному разу, при этом данный путь должен быть без петель. Входными данными для рассмотренной задачи является матрица расстояний, которая может формироваться из различных технологических карт в зависимости от области применения.

Задача коммивояжера с математической точки зрения может быть поставлена следующим образом:

Пусть имеется множество городов (вершин)  $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$ , где  $n$  это количество городов (вершин); матрица расстояний  $D = \{d_{ij}\}$ , где  $d_{ij}$  – расстояние между городами (вершинами)  $i$  и  $j$ . Необходимые условия:

$$d_{ij} > 0 \text{ для всех } i, j;$$

$d_{ii} = 0$  для всех  $i$ ;

$d_{ij} = d_{ji}$  для симметричности задачи коммивояжера.

Требуется найти гамильтонов цикл минимальной длины, то есть маршрут  $p = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$  где  $p_i$  – номер города (вершины) в последовательности обхода.

В общем случае все методы решения задачи коммивояжера можно разделить на две группы: точные методы и эвристические методы. Точные методы позволяют найти оптимальное решение задачи коммивояжера – в этом и заключается их главное преимущество. Недостатком является их вычислительная и алгоритмическая сложность, которая увеличивается вместе с количеством городов (вершин) соответственно. В данной работе для анализа будем использовать метод ветвей и границ.

К следующей группе относятся эвристические методы. Они характеризуются относительно невысокой вычислительной сложностью, что делает их применение на больших итерациях более эффективным. Недостатком таких методов является то, что с большой вероятностью полученное решение будет являться не самым оптимальным. Для анализа в работе будем использовать следующие алгоритмы [2]: алгоритм имитации отжига металла, генетический алгоритм, жадный алгоритм, муравьиный алгоритм.

*Метод ветвей и границ.* Как было сказано ранее метод ветвей и границ относится к точным методам решения задачи коммивояжера. С ростом числа городов (вершин) время работы метода экспоненциально растет. Это обуславливается тем, что данный алгоритм находит наиболее оптимальное решение задачи. Его времененная сложность равна  $O(n^k)$ , где  $n$  – число ветвей на каждом уровне,  $k$  – глубина дерева решения [3]. Идея метода заключается в построении усеченного дерева перебора, причем усечение ветвей, заведомо не содержащих глобально оптимальных решений, производится на основании оценки снизу значения целевой функции [4]. Данная оценка вычисляется с помощью приведения матриц. Принцип приведения матрицы расстояния заключается в её пошаговом уменьшении. Приведение производится по строкам и столбцам матрицы соответственно.

*Алгоритм имитации отжига металла.* В основе идеи данного метода лежит физический процесс «отжига» металла. В ходе процесса металл сначала нагревают, что позволяет атомам кристаллической решетки покинуть свои позиции и свободно перемещаться [5]. Далее металл начинают медленно охлаждать, и атомы пытаются попасть в состояния с наименьшей энергией, однако это не всегда у них получается. С уменьшением температуры металла уменьшается вероятность попасть в состояние с большей энергией. Проводя аналогию с решением задачи коммивояжера, будем считать, что позиции атомов являются городами (вершинами). Соответственно совокупность этих вершин является маршрутом, и чем ниже уровень энергии атомов, тем короче будет маршрут. Временная сложность данного алгоритма будет зависеть от количества итераций и равна  $O(k \cdot n)$ , где  $k$  – количество итераций.

*Жадный алгоритм.* Жадный алгоритм является эвристическим подходом к решению задачи коммивояжера и имеет временную сложность равную  $O(n)$ . Идея данного алгоритма заключается в нахождении локального оптимума на каждом шаге решения. То есть на каждом этапе будем выбирать лучший локальный выбор, который минимизирует текущую стоимость общего пути. Вследствие этого возникает отсутствие гарантии оптимальности и выбор, который является локальным оптимумом, может не приводить к глобально оптимальному маршруту.

*Муравьиный алгоритм.* Муравьиный алгоритм является эвристическим методом решения задачи коммивояжера. Идея работы данного алгоритма основана на поведении муравьиной колонии в природе. При перемещении муравьи оставляют после себя биологическое вещество – феромон. И чем больше концентрации данного вещества будет на опреде-

ленном пути, тем больше муравьев будут перемещаться по нему. Временная сложность алгоритма равна  $O(k \cdot m \cdot n)$ , где  $k$  – количество итераций,  $m$  – количество муравьев. Для повышения эффективности алгоритма вводятся так называемые элитные муравьи, которые передвигаются по лучшему пути. Таким образом они усиливают ребра наилучшего маршрута, оставляя за собой феромон.

**Генетический алгоритм.** Генетический алгоритм относится к группе эвристических методов решения задачи коммивояжера. Идея данного алгоритма основывается на процессе естественного отбора и операциях скрещивания и мутации множества маршрутов. Временная сложность данного алгоритма равна  $O(k \cdot p \cdot n)$ , где  $k$  – количество поколений,  $p$  – размер популяции.

Разработку алгоритмов будем осуществлять на языке программирования C++. Для создания интерфейса будем использовать фреймворк Qt версии 5.7.0. Структурно интерфейс программы будет состоять из четырех основных блоков: алгоритмы решения, начальные условия алгоритма, матрица расстояний, результаты эксперимента. Программа позволяет выбрать нужный алгоритм, задать ему входные данные, сгенерировать матрицу расстояний необходимого порядка, рассчитать кратчайший путь матрицы расстояний и замерить время работы алгоритма.

Зависимость времени работы алгоритма  $T$  и длины пути  $L$  от порядка матрицы расстояний  $N$  представлена в таблице 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Порядок матрицы расстояний( $N$ )	Метод Ветвей и границ		Алгоритм имитации отжига металла		Жадный алгоритм		Муравьиный алгоритм		Генетический алгоритм	
	L	T (мин-с-мс)	L	T (мин-с-мс)	L	T (мин-с-мс)	L	T (мин-с-мс)	L	T (мин-с-мс)
5	137,284	00-00-000	137,284	0-00-008	140,522	00-00-000	137,284	00-00-022	137,284	00-00-050
6	116,204	00-00-000	116,204	00-00-010	123,832	00-00-000	116,204	00-00-023	116,204	00-00-049
7	107,274	00-00-001	107,274	00-00-009	107,274	00-00-000	107,274	00-00-034	107,274	00-00-048
8	111,999	00-00-001	111,999	00-00-011	113,514	00-00-000	111,999	00-00-032	111,999	00-00-046
9	135,592	00-00-013	135,592	00-00-010	164,905	00-00-000	135,592	00-00-024	135,592	00-00-060
10	98,2841	00-00-008	98,2841	00-00-010	130,718	00-00-000	98,2841	00-00-024	98,2841	00-00-094
11	98,6719	00-00-040	98,6719	00-00-013	115,257	00-00-000	98,6719	00-00-028	98,6719	00-00-101
12	115,516	00-00-266	115,516	00-00-012	154,153	00-00-000	115,516	00-00-030	120,07	00-00-137
13	109,143	00-00-304	109,143	00-00-012	184,098	00-00-000	109,143	00-00-045	109,143	00-00-179
14	106,591	00-00-484	109,558	00-00-005	142,686	00-00-000	106,561	00-00-041	119,003	00-00-051
15	125,521	00-02-531	129,129	00-00-013	167,886	00-00-000	125,521	00-00-048	147,115	00-00-439
18	150,598	03-57-834	161,514	00-00-012	195,471	00-00-000	150,598	00-00-051	178,039	00-00-434
20	141,475	89-51-573	141,475	00-00-013	185,635	00-00-000	145,95	00-00-051	196,061	00-00-430
30	-	-	195,296	00-00-012	212,374	00-00-000	133,862	00-00-121	246,722	00-00-521
40	-	-	165,567	00-00-023	202,587	00-00-000	152,331	00-00-197	272,716	00-02-356
50	-	-	243,535	00-00-015	246,091	00-00-000	195,182	00-00-283	401,578	00-02-689
70	-	-	225,005	00-00-159	239,594	00-00-000	198,915	00-00-534	563,812	00-03-682
100	-	-	308,07	00-00-195	335,242	00-00-000	243,067	00-01-030	845,395	00-09-832
150	-	-	352,891	00-00-764	397,743	00-00-001	265,98	00-02-233	1509,2	00-11-479
200	-	-	405,939	00-02-884	456,308	00-00-002	317,369	00-03-510	2317,9	00-17-188
300	-	-	575,656	00-06-283	576	00-00-006	429,145	00-08-141	3800,28	00-42-933
400	-	-	745,302	00-10-764	712,343	00-00-010	566,441	00-14-053	5768,13	00-39-461
500	-	-	929,855	00-13-658	903,699	00-00-012	661,921	00-22-394	7824,64	00-48-925

Метод ветвей и границ и жадный алгоритм не имеют входных изменяемых данных, поэтому влияние человека на них при проведении эксперимента отсутствует. Для алгоритма имитации отжига металла использовались следующие значения входных переменных: начальная температура – 1000, конечная температура – 1, коэффициент охлаждения 0.9, количество итераций на одной температуре – 100. Для муравьиного алгоритма: количество муравьев – 20, количество итераций – 100, скорость испарения феромона – 0.10, влияние феромона – 1.00, влияние расстояния – 2.00, количество элитных муравьев – 5, вес феромона элитных муравьев – 2.00. Для генетического алгоритма: размер популяции – 100, количество

поколений – 100 и вероятность мутации – 0.01. В процессе эксперимента значения изменялись. На рисунках 1, 2, 3 показаны зависимости входных данных алгоритмов от порядка матрицы расстояний ( $N$ ).

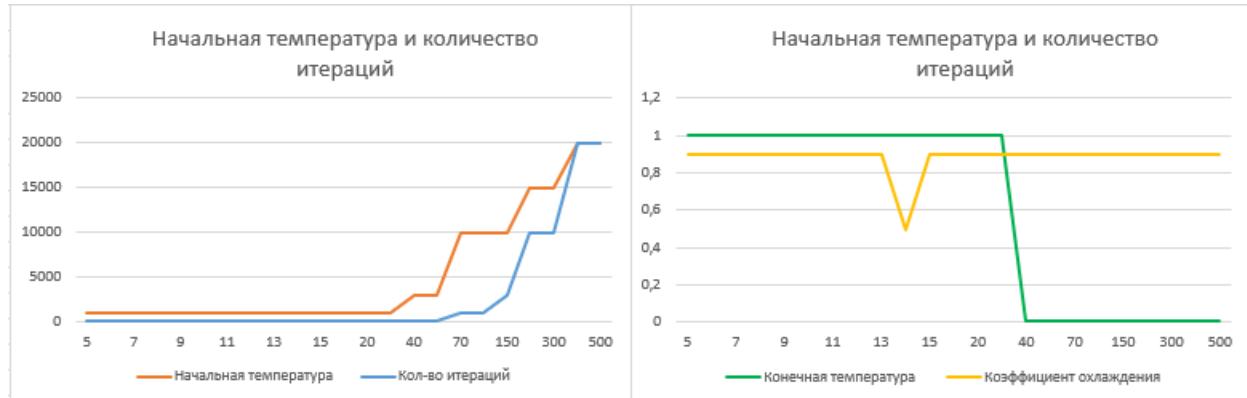


Рис. 1. Зависимость входных данных в алгоритме имитации отжига металла от  $N$

Из графиков на рисунке 1 мы видим, что начальная температура и количество итераций при больших значениях  $N$  начинают увеличиваться. Конечная температура, наоборот при больших значениях  $N$  уменьшается. Коэффициент охлаждения на протяжении всего эксперимента постоянен, за исключением расчета при котором  $N = 14$ .

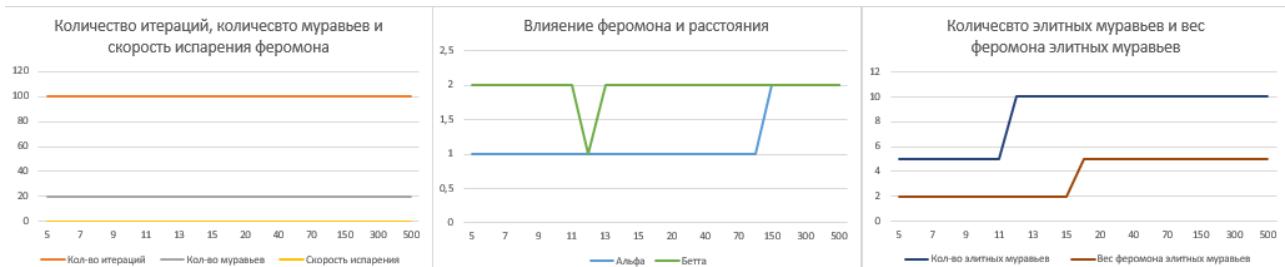


Рис. 2. Зависимость входных данных муравьиного алгоритма от  $N$

Из графиков на рисунке 2 мы видим, что количество итераций, количество муравьев и скорость испарения феромона на протяжении всего эксперимента не изменяется, так как эти входные данные не оказывают сильное влияние на эффективность данного алгоритма при используемых значениях  $N$ . Коэффициент, который отвечает за влияние расстояния на выбор маршрута, постоянен на протяжении всего эксперимента, за исключением расчета, при котором  $N = 12$ . Коэффициент, который отвечает за влияние феромона на выбор маршрута, увеличивается при больших значения  $N$ . Количество элитных муравьев и вес их феромона также увеличиваются при больших значениях  $N$ .

Из гистограммы на рисунке 3 мы видим, что наибольшее влияние на эффективность работы генетического алгоритма оказывает количество поколений, которое увеличивается при больших значениях  $N$ . Размер популяции также увеличивается, но значительно меньше.

Из таблицы 1 можем заметить, что наибольшей временной сложностью обладает метод ветвей и границ. Если при  $N = 10$  алгоритм заканчивал свою работу за 8 миллисекунд, то при  $N = 20$  он работал 1,5 часа. Вследствие чего эксперимент для него проводился при  $5 \leq N \leq 20$ .

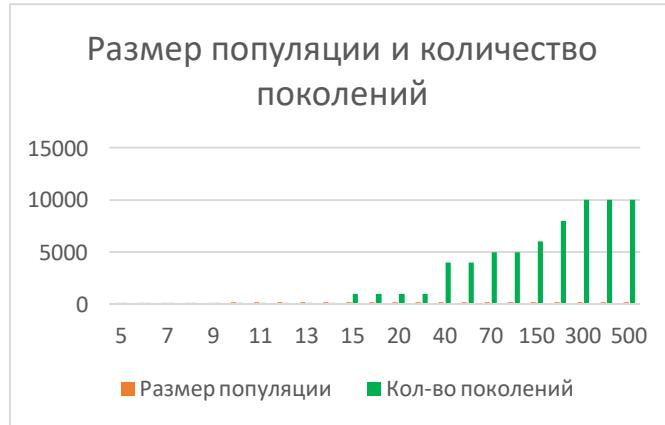


Рис. 3. Зависимость входных данных генетического алгоритма от N

Для оценки эффективности работы эвристических алгоритмов построим графики зависимости времени их работы и значения рассчитанного пути от порядка матрицы расстояний (рисунки 4, 5).

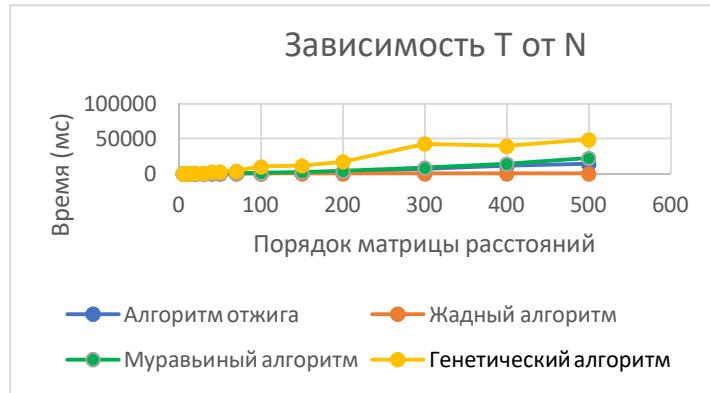


Рис. 4. Зависимость времени работы алгоритмов от N

Из графика на рисунке 4 мы наблюдаем, что с увеличением значения N самым затратным по времени является генетический алгоритм, далее следует муравьиный алгоритм, алгоритм имитации отжига металла и самым емким является жадный алгоритм.

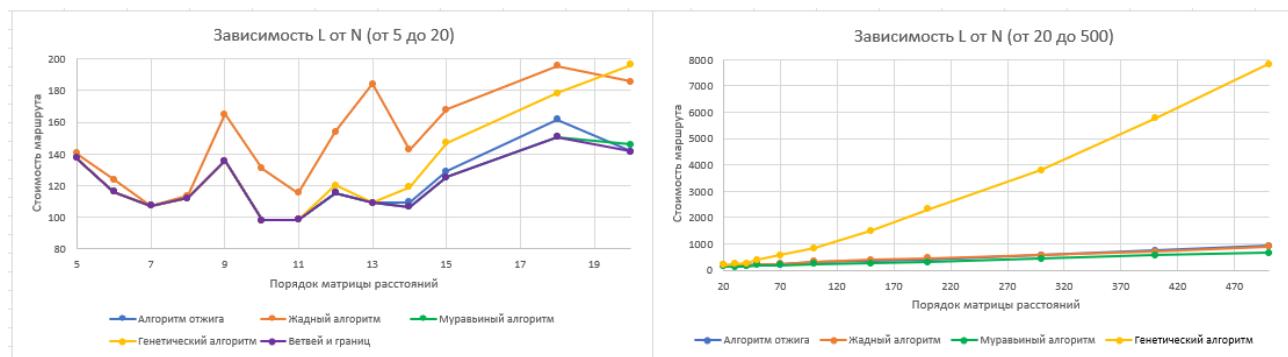


Рис. 5. Зависимость длины маршрута от N

На графике слева (рисунок 5) эталонном является метод ветвей и границ, так как он является точным методом и высчитывает кратчайший маршрут. Мы видим, что до  $N = 11$  все алгоритмы, кроме жадного, считают самый оптимальный путь. При  $N > 11$  генетический алгоритм и алгоритм отжига перестают считать оптимальный путь. Наиболее точным из эв-

ристических алгоритмов является муравьиный, так как до  $N = 18$  он просчитывает кратчайший путь.

При анализе работы алгоритмов с матрицами расстояний больших порядков также можно сделать вывод, что генетический алгоритм является отстающим по сравнению с алгоритмом отжига и муравьиным алгоритмом. Мы видим, что даже жадный алгоритм при таких значениях  $N$  является более эффективным, нежели генетический.

Таким образом, объединив все полученные результаты, можем сделать вывод:

- при небольших значениях порядка матрицы расстояний ( $N \leq 11$ ) целесообразно будет использовать метод ветвей и границ, так как он будет гарантированно давать самый оптимальный маршрут и при этом его времененная сложность будет очень мала;
- при  $11 \leq N \leq 500$  следует использовать муравьиный алгоритм или алгоритм имитации отжига. Муравьиный алгоритм будет давать более короткий маршрут, но при этом затрачивать больше времени на его нахождение. Алгоритм отжига наоборот будет давать маршрут длиннее и затрачивать меньше времени;
- жадный алгоритм высчитывает путь моментально так, например при  $N = 500$  он дает решение за 12 миллисекунд, но оптимальность маршрута при этом далеко не идеальная. Такой алгоритм возможно будет полезен при очень больших значениях порядка матрицы расстояний ( $N < 1000$ );
- среди эвристических алгоритмов генетический оказался самый затратный по времени и при  $N > 20$  давал самый неоптимальный маршрут.

## Библиографический список

1. Задача коммивояжера – Википедия [Электронный ресурс] / wikipedia. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Задача\\_коммивояжера](https://ru.wikipedia.org/wiki/Задача_коммивояжера), свободный. (дата обращения: 06.01.2025).
2. Семенов С. С., Педан А. В., Воловиков В. С., Климов И. С. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 116–131. URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2017-01/08-Semenov.pdf>.
3. Задача коммивояжера | Алгоритмы на графах – hexlet [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.hexlet.io/courses/algorithms-graphs/lessons/traveling-salesman-problem/theory\\_unit](https://ru.hexlet.io/courses/algorithms-graphs/lessons/traveling-salesman-problem/theory_unit), свободный. (дата обращения: 09.01.2025).
4. Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ. Часть 4 «Оптимизация управляющих программ технологических автоматов» методические указания к практическим самостоятельным и лабораторным занятиям, / РГРТУ: сост. Таганов А.И., Туманов В.А. Рязань, 2019. 28 с.
5. Введение в оптимизацию. Имитация отжига – Хабр [Электронный ресурс] / habr. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/209610/> свободный. (дата обращения: 20.01.2025).

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СТЕРЕО И ПЛОЩАДНОЙ СЪЁМКИ

А.С. Горобченко, М.М. Егин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, alexo375 @yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются методы обнаружения изменений на спутниковых снимках, полученных при стереоскопической и площадной съемке. Анализируются традиционные алгоритмы (разностный метод, регрессионный анализ, PCA, PCC) и нейросетевые подходы (CNN, RNN, гибридные модели, автоэнкодеры). Представлены математические модели, принципы обучения и основные критерии оценки качества (Accuracy, Precision, Recall, F-score), обсуждаются преимущества и ограничения методов.

**Ключевые слова:** обнаружение изменений; спутниковые снимки; дистанционное зондирование; стереоскопическая съемка; площадная съемка; нейросетевые методы; глубокое обучение.

## ANALYSIS OF CHANGE DETECTION ALGORITHMS FOR STEREO AND AREA SURVEY DATA PROCESSING

A.S. Gorobchenko, M.M. Egin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, alexo375@yandex.ru

*The summary.* The paper examines change detection methods in satellite imagery acquired through stereo and area imaging. It reviews traditional algorithms (image differencing, regression analysis, PCA, PCC) alongside neural network approaches (CNN, RNN, hybrid models, autoencoders). Mathematical models, training principles, and evaluation metrics (Accuracy, Precision, Recall, F-score) are presented, the advantages and limitations of the methods are discussed.

*Keywords:* change detection; satellite imagery; remote sensing; stereoscopic photography; areal photography; neural network methods; deep learning.

### Введение

В условиях стремительного развития оптических технологий дистанционного зондирования Земли и повышения пространственного разрешения получаемых изображений результаты съемки находят большее применение в таких областях, как анализ землепользования, экологический контроль и оценка воздействия природных и антропогенных факторов.

Современные космические аппараты (КА), в частности, КА «Ресурс-П» [1], могут осуществлять съемку в режимах: объектовой, маршрутной, стереоскопической и площадной. В режиме стерео и площадной съемки на одном витке в результате сложного углового движения КА снимает одну или смежные области земной поверхности соответственно. При обработке данных, полученных в этих режимах, возникает задача обнаружения изменений, произошедших в процессе перенацеливания, и изменений, обусловленных изменением угла съемки. Обнаруженные изменения могут быть использованы при дальнейшей обработке, например, для их маскирования на выходных продуктах.

**Целью** настоящей работы является исследование существующих методов обнаружения изменений применительно к данным стерео и площадной съемки с учетом их особенностей. Для решения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

- 1) выполнить обзор существующих подходов к решению задачи обнаружения изменений на спутниковых изображениях;
- 2) проанализировать применимость рассматриваемых подходов к данным стерео и площадной съемки;
- 3) рассмотреть методы оценки качества алгоритмов обнаружения изменений.

### 1. Обзор существующих алгоритмов обнаружения изменений

При обработке данных, полученных в результате стерео и площадной съемки, одним из этапов получения выходных продуктов является блочное уравнивание [2]. Необходимость блочного уравнивания обуславливается недостаточной точностью геодезической привязки в области пересечения маршрутов. В процессе уравнивания минимизируются невязки в опорных и одноименных точках маршрутов введением поправок в исходную модель геодезической привязки. В настоящей работе подразумевается, что величина остаточных рассогласований одноименных объектах в результате выполнения блочного уравнивания составляет не более 5 пикселей.

Пусть одноканальное изображение  $I(x, y)$  характеризуется размерами  $w \times h$  и представлено двумерной дискретной функцией яркости, определенной в пикселях с координатами  $(x, y)$ , где  $y = 0, h - 1$  и  $x = 0, w - 1$ . Исходными данными рассматриваемых алгоритмов обнаружения изменений являются два изображения  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$  одной местности размера  $w \times h$  с одинаковым пространственным и радиометрическим разрешением. Требуется найти изображение  $M(x, y)$ , характеризующее изменение в изображениях  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$ .

Если значение яркости  $M$  в пикселе с координатами  $(x, y)$  равно нулю, значит изменение отсутствует, иначе — значение характеризует величину изменений.

Существующие методы детектирования изменений могут быть условно разделены на две группы — традиционные алгоритмы и современные, основанные на нейросетевых подходах.

### 1.1. Традиционные алгоритмы обнаружения изменений

Традиционные подходы к обнаружению изменений в спутниковых изображениях обладают рядом преимуществ — простотой реализации и относительно низкими вычислительными затратами, однако зачастую требуют ручной настройки параметров и тщательного предварительного анализа данных.

#### Разностный метод (Image Differencing)

Разностный метод [5, 6] основан на вычислении разности значений соответствующих пикселей двух изображений, полученных в разные моменты времени. Результирующее изображение содержит разницу яркостей, где пиксели с превышением заданного порога интерпретируются как изменившиеся. Для каждого пикселя рассчитывается абсолютная разность:

$$D(x, y) = |I_2(x, y) - I_1(x, y)|.$$

После чего производится пороговая фильтрация и формируется выходное изображение:

$$M(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } D(x, y) < T, \\ D(x, y), & \text{если } D(x, y) \geq T, \end{cases}$$

где значение  $T$  подбирается эмпирически или на основании анализа шумовых характеристик изображений.

Преимущества: простота реализации, минимальные вычислительные затраты.

Недостатки: даже небольшое смещение (например, 5 пикселей) приводит к сильному шуму — это особенно заметно в районах с высокой текстурой, таких как густо застроенные жилые кварталы, где ошибки вычитания создают ложные изменения.

#### Регрессионный анализ (Image Regression)

Предполагается, что между значениями пикселей двух изображений существует линейная зависимость [5, 7]. Такая зависимость может возникнуть, например, из-за влияния атмосферных условий или изменений освещенности. В рамках метода второе изображение «выравнивается» относительно первого:

$$I_2(x, y) = a \cdot I_1(x, y) + b + \varepsilon(x, y),$$

где  $a$  и  $b$  подбираются методом наименьших квадратов по всем пикселям:

$$\min_{a,b} \sum_{x,y} [I_2(x, y) - (a \cdot I_1(x, y) + b)]^2,$$

и где  $\varepsilon(x, y)$  — остаточная ошибка.

После определения параметров вычисляется ошибка для каждого пикселя:

$$R(x, y) = |I_2(x, y) - (a \cdot I_1(x, y) + b)|.$$

Аналогично разностному методу при создании карты изменений применяется порог  $T$ :

$$M(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } R(x, y) < T, \\ R(x, y), & \text{если } R(x, y) \geq T. \end{cases}$$

Таким образом, пиксели, для которых остаточная ошибка достаточно велика, трактуются как изменившиеся.

**Преимущества:** позволяет компенсировать систематические различия между изображениями.

**Недостатки:** эффективность метода зависит от корректности выбранной модели; при наличии нелинейных эффектов модель может работать не оптимально.

### Сравнение после классификации (РСС)

Каждый из исходных снимков подвергается классификации с целью присвоения каждому пикселю метки класса. Изменения фиксируются в местах смены класса [4, 5].

Для каждого изображения применяется функция классификации  $f(I(x, y))$ , которая сопоставляет каждому пикселю метку класса. Для каждого пикселя сравниваются полученные метки и строится карта изменений:

$$M(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } f(I_1(x, y)) = f(I_2(x, y)), \\ 1, & \text{если } f(I_1(x, y)) \neq f(I_2(x, y)). \end{cases}$$

**Преимущества:** позволяет получать тематическую карту изменений, которая может быть легко интерпретирована конечными пользователями.

**Недостатки:** ошибки классификации на начальном этапе могут привести к ложным срабатываниям при сравнении, а также требуется качественная обучающая выборка для корректной работы классификатора.

### 1.2. Алгоритмы обнаружения изменений на основе нейросетей

За последние годы развитие глубокого обучения существенно расширило возможности автоматической обработки изображений. Нейросетевые алгоритмы демонстрируют высокую адаптивность, способность извлекать сложные пространственные и спектральные признаки, а также работать с большими объемами данных, однако они требуют значительных вычислительных ресурсов, большого объема обучающей выборки и являются «чёрными ящиками», что затрудняет интерпретацию результатов.

Исходными данными обычно являются объединённые изображения «до» и «после», сформированные в один тензор:

$$X(x, y) = [I_1(x, y), I_2(x, y)].$$

Цель – обучить нейросеть  $F(X; \theta)$  на сопоставление входного тензора с картой изменений  $M(x, y)$ , где  $\theta$  – набор гиперпараметров модели.

### Сверточные нейронные сети (CNN)

CNN [5, 8] используются для автоматического выделения локальных признаков (текстур, краев, форм) из изображений. В процессе обучения сеть «учится» распознавать закономерности, характерные для изменившихся областей.

Каждый сверточный слой применяет набор фильтров  $w_l$  для извлечения локальных признаков, то есть:

$$h_l(x, y) = \sigma \left( \sum_{i,j} w_l(i, j) \cdot X(x+i, y+j) + b_l \right),$$

где  $\sigma$  – функция активации (например, ReLU), а  $b_i$  – смещение.

После прохождения через несколько слоев происходит объединение в полносвязные слои, итогом которых является предсказание карты изменений:

$$M(x, y) = f_{\text{CNN}}(X(x, y); \theta).$$

Сеть обучается на размеченной выборке с использованием, например, функции потерь бинарной кросс-энтропии:

$$\mathcal{L} = - \sum_{x,y} [M_{\text{true}}(x, y) \log M(x, y) + (1 - M_{\text{true}}(x, y)) \log (1 - M(x, y))].$$

Преимущества: автоматическое извлечение сложных признаков, высокая точность при достаточном объёме обучающих данных.

Недостатки: требует значительных вычислительных ресурсов и тщательно подобранный архитектуры сети; при изменении угла съёмки (например, когда наклон зданий увеличивается) CNN могут ошибочно интерпретировать изменения, особенно если архитектура не адаптирована к геометрическим искажениям – это может привести к ложной детекции изменений в городской застройке.

### **Рекуррентные нейронные сети (RNN)**

RNN [5, 9] предназначены для анализа последовательностей данных, поэтому они особенно полезны, если имеется временной ряд изображений (например, наблюдения за объектом в разные периоды). Благодаря внутреннему состоянию сеть может «запоминать» информацию о предыдущих изображениях.

Пусть имеется последовательность изображений  $I_t(x, y)$  для  $t = 1 \dots T$ . Для каждого временного шага сеть обновляет скрытое состояние:

$$h_t(x, y) = \sigma(W * I_t(x, y) + U * h_{t-1}(x, y) + b),$$

где  $W$  и  $U$  – матрицы весов, а  $b$  – смещение.

После обработки всех временных шагов итоговое состояние  $h_T(x, y)$  (либо функция от всех состояний  $h_1, \dots, h_T$ ) используется для формирования карты изменений:

$$M(x, y) = g(h_1(x, y), h_2(x, y), \dots, h_T(x, y)).$$

Функция  $g$  может быть реализована, например, через полносвязный слой с функцией активации.

Преимущества: позволяет учитывать динамику изменений и временные зависимости, что особенно важно для мониторинга процессов.

Недостатки: обучение RNN может быть затруднено проблемами исчезающего или взрывающегося градиента, а также требуется больше данных для захвата временной зависимости.

### **Гибридные архитектуры**

Для решения сложных задач обнаружения изменений разрабатываются гибридные модели [10], сочетающие преимущества различных базовых моделей. Например, можно объединить преимущества CNN и RNN.

Сначала объединение двух изображений «до» и «после» подается на вход CNN. Сверточные слои обучаются выявлять характерные признаки – границы, углы, конфигурации обь-

ектов. Результатом является набор признаковых карт, который отражает пространственную структуру исходных данных.

Затем происходит обработка временных зависимостей с помощью RNN. Последовательность пространственных признаков, извлечённых CNN, передается на вход RNN, которая уже выявляет динамику изменений во времени. Итоговое состояние RNN содержит информацию как о пространственной структуре, так и о временной эволюции, что позволяет формировать карту изменений.

После этого объединённое представление обрабатывается дополнительными слоями (например, полно связанными), чтобы сформировать окончательную карту изменений  $M(x, y)$ . Математически итоговая модель может быть записана как:

$$M(x, y) = f_{\text{hybrid}}(I_1(x, y), I_2(x, y); \theta).$$

**Преимущества:** более надёжное обнаружение изменений в условиях сложных динамических процессов – например, когда изменения обусловлены как небольшими смещениями, так и постепенным изменением освещенности в результате смены угла съёмки.

**Недостатки:** повышенная вычислительная сложность. При наличии ошибок геопривязки гибридная модель может требовать более тщательной предобработки, особенно в районах с резкими переходами, как в участках с высокими небоскрёбами, где динамика теней может вводить дополнительные помехи.

### Использование автоэнкодеров

Автоэнкодеры [11] представляют собой особый тип нейросетей. Они состоят из двух основных компонентов: энкодера и декодера.

Энкодер  $E$  – это последовательность сверточных слоев (возможно с операциями пулинга) которая сжимает входное изображение до компактного представления (вектора)  $z$ :

$$z = E(I_1(x, y) + I_2(x, y)).$$

Пространство  $z$  содержит наиболее значимые для обнаружения изменения признаки. Декодер  $D$  принимает на вход вектор  $z$  и реконструирует карту изменений:

$$M(x, y) = D(z).$$

Он, как правило, представляет собой обратную архитектуру энкодера и восстанавливает пространственную структуру исходных данных. Обучение происходит в режиме без учителя – автоэнкодер минимизирует разницу между исходным изображением и восстановленным, используя, например, функцию потерь типа MSE:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{N} \sum_{x,y} (X(x, y) - D(E(X(x, y))))^2$$

**Преимущества:** автоэнкодеры способны уменьшать влияние мелких шумов, возникающих из-за геометрических рассогласований объектов, сохраняя при этом ключевые признаки изменений; позволяют уменьшить количество данных, оставив только самую важную информацию, что упрощает дальнейшую обработку.

**Недостатки:** если сжатие происходит слишком агрессивно, то могут быть утрачены небольшие, но значительные изменения.

## 2. Критерии оценки качества алгоритмов обнаружения изменений

Для количественной оценки качества выделения изменений используются следующие метрики [3].

**Accuracy (Точность)** – метрика, показывающая долю правильно классифицированных пикселей от общего числа пикселей:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

где  $TP$  (true positive) – правильно определённые изменённые пиксели;  $TN$  (true negative) – правильно определённые неизменённые пиксели;  $FP$  (false positive) – ложно определённые изменения;  $FN$  (false negative) – пропущенные изменения.

**Precision (Точность обнаружения)** – метрика, показывающая долю правильно идентифицированных изменений среди всех изменений:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}.$$

**Recall (Полнота)** – метрика, показывающая долю правильно идентифицированных изменений среди реальных изменений:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}.$$

**F-score (F-мера)** – метрика, показывающая среднее гармоническое между precision и recall, то есть попытка объединить две метрики в одну. В общем случае рассчитывается:

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{(\beta^2 \cdot \text{Precision}) + \text{Recall}},$$

где  $\beta$  – это коэффициент, определяющий влияние полноты (recall) по сравнению с точностью (accuracy). Зачастую  $\beta$  берется равным 1.

## Заключение

Традиционные методы обнаружения изменений по-прежнему остаются актуальными благодаря своей простоте и наглядности, однако их точность часто ограничивается в связи с необходимостью ручного подбора гиперпараметров и чувствительностью к шуму.

В свою очередь, нейросетевые подходы, основанные на DNN, демонстрируют высокую адаптивность и способность автоматически извлекать сложные признаки, что делает их предпочтительными при работе с большими и сложными наборами данных, однако их реализация требует значительных вычислительных ресурсов и большого объема обучающей выборки.

## Библиографический список

1. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми с космической системы «Ресурс-П» — 2023 г. [Электронный ресурс] // URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol.zovatela.dannimi.dzz.polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf> (дата обращения 24.02.2025).
2. Егин М.М., Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Алгоритм блочного уравнивания снимков, привязанных по RPC-модели // сб. тр. IV междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. — BookJet, 2021.
3. Change Detection Methods for Remote Sensing in the Last Decade: A Comprehensive Review [Электронный ресурс] / Cheng G., Huang Y., Li X., Lyu S., Xu Z., Zhao H., Zhao Q., Xiang S. // Remote Sensing. 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16132355> (дата обращения: 25.02.2025).
4. Иванов И.И.; Сидоров С.С. Анализ методов автоматизированного выделения изменений различных объектов на спутниковых снимках [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации. 2016. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/08/70887> (дата обращения: 25.02.2025).
5. Afaq Y., Manocha A. Analysis on change detection techniques for remote sensing applications: A review [Электронный ресурс] // Ecological Informatics. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101310> (дата обращения: 25.02.2025).

6. Learning to measure change: fully convolutional siamese metric networks for scene change detection [Электронный ресурс] / Guo E., Fu X., Zhu J., Deng M., Liu Y., Zhu Q., Li H. // arXiv preprint. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1810.09111> (дата обращения: 25.02.2025).
7. Change detection in remote sensing images based on image mapping and a deep capsule network [Электронный ресурс] / Ma W., Xiong Y., Wu Y., Yang H., Zhang X., Jiao L. // Remote Sens. №11 (6). 2019. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11060626> (дата обращения: 25.02.2025).
8. A novel change detection approach for multi-temporal high-resolution remote sensing images based on rotation forest and coarse-to-fine uncertainty analyses / Feng, W., Sui, H., Tu, J., Huang, W., Xu, C., Sun, K. // Remote Sens. №10 (7). 2018. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10071015> (дата обращения: 25.02.2025).
9. Change detection in multisource VHR images via deep siamese convolutional multiple-layers recurrent neural Network [Электронный ресурс] / Chen H., Wu C., Du B., Zhang L., Wang L. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. №58 (4). 2020. С. 2848–2864. URL: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2956756> (дата обращения: 25.02.2025).
10. Asokan A., Anitha J. Change detection techniques for remote sensing applications: a survey [Электронный ресурс] // Earth Sci. Inf. 2019. URL: <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00380-5> (дата обращения: 25.02.2025).
11. Fan J., Lin K., Han M. A novel joint change detection approach based on weight clustering sparse autoencoders // IEEE J. Select. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. №12 (2), 2019. С. 685–699. URL: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2892951> (дата обращения: 25.02.2025).

УДК 621.37; ГРНТИ 47.47

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Е.П. Васильев, Д.Х. Нгуен

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, evasiliev48@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается модернизация метода оптимизации конструкции МЭМС-переключателя с резистивными контактами типа «металл–металл» для улучшения его рабочих характеристик, таких как коэффициент отражения и коэффициент передачи на включение, изоляция на выключение. Для достижения этой цели рассматривается изменение конструктивных параметров, а именно длины и ширины нижней металлической контактной площадки линии передачи, которые изменяются одновременно. В процессе оптимизации используются три метода: квази-ньютоновский метод, генетический алгоритм и метод Хука-Дживса. Эти методы позволяют исследовать различные подходы к нахождению оптимальных параметров конструкции и сравнить их эффективность.

**Ключевые слова:** МЭМС-переключатели, оптимизация, метод Хука-Дживса, генетический алгоритм и квази-ньютоновский метод, HFSS, коэффициент отражения, коэффициент передачи, изоляция, режим включения, режим выключения.

## APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS AND ALGORITHMS FOR MEMS SWITCH MODELING

E.P. Vasiliev, D.H. Nguyen

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, evasiliev48@mail.ru

**The summary.** The paper discusses the modernized development of the design optimization method for MEMS switches with metal-to-metal resistive contacts to improve its performance characteristics, such as the reflection coefficient and the on-state transfer coefficient, and the off-state isolation. To achieve this goal, the physical parameters of the design are considered, namely the length and width of the lower metal contact pad of the transmission line, which are changed simultaneously. Three methods are used in the optimization process: the quasi-Newton method, the genetic algorithm, and the Hooke-Jeeves method. These methods allow us to explore different approaches to finding the optimal design parameters and compare their effectiveness.

**Keywords:** MEMS switches, optimization, pattern search, genetic algorithm, and quasi-Newton method, HFSS, reflection coefficient, transfer coefficient, isolation, on-state, off-state.

С ростом рабочих частот и мощностей сигналов использование таких традиционных радиочастотных переключателей, как PIN-диоды и полевые транзисторы, становится проблематичным. Альтернативным решением проблемы может быть применение МЭМС (мик-

роэлектромеханические системы) переключателей, которые заменяют полупроводниковые транзисторы с полевым эффектом, например, GaAs FET, а также PIN-диоды, диоды Шоттки и электромагнитные реле. МЭМС-переключатели используются в коммутационных сетях, спутниковых системах, фильтрах с диапазоном от 0,1 до 100 ГГц.

МЭМС-переключатели продемонстрировали исключительную производительность на высоких частотах по сравнению с традиционной полупроводниковой технологией. Преимущества МЭМС-переключателей по сравнению с полупроводниковыми переключателями включают возможность массового производства с использованием литографической микроборьбы, низкие потери на включение (около 0,2 дБ), высокую изоляцию (около 40 дБ), малые емкости в выключенном состоянии (2–4 фемтофарада), высокую линейность и низкое энергопотребление. Поэтому с целью повышения качества проектирования данного класса устройств целесообразно сравнить наиболее эффективные методы оптимизации и модернизировать наиболее перспективный.

Сравнение производительности различных радиочастотных электронных переключателей показано в таблице 1 [1].

Таблица 1. Основные параметры различных электронных переключателей

	PIN-диода	Полевые транзисторы (ПТ) на основе GaAs	МЭМС
Потери на включение (дБ)	0.3–1.0	0.4–2	0.05–2
Изоляция (дБ)	> 25	> 25	> 40
Напряжение (В)	5–10	5–30	5–80
Ток (мА)	3–20	~0	0
Время переключения	1–100 нс	1–20 нс	1–40 мкс
Рабочая частота (ГГц)	до 40	до 40	до 100
Динамическая мощность управления, (мВт)	5–100	0.05–0.1	0.05–0.1

### МЭМС-переключатели с резистивными контактами типа «металл–металл»

Контакты МЭМС-переключателей бывают двух видов: резистивные «металл–металл» и емкостные «металл–диэлектрик–металл». Резистивные «металл–металл» (рис. 1), которые характеризуются низким сопротивлением во включенном состоянии ( $R_s$ ), которое обычно составляет доли ома, и ёмкостью в выключенном состоянии ( $C_t$ ) в пределах нескольких фемтофарад.

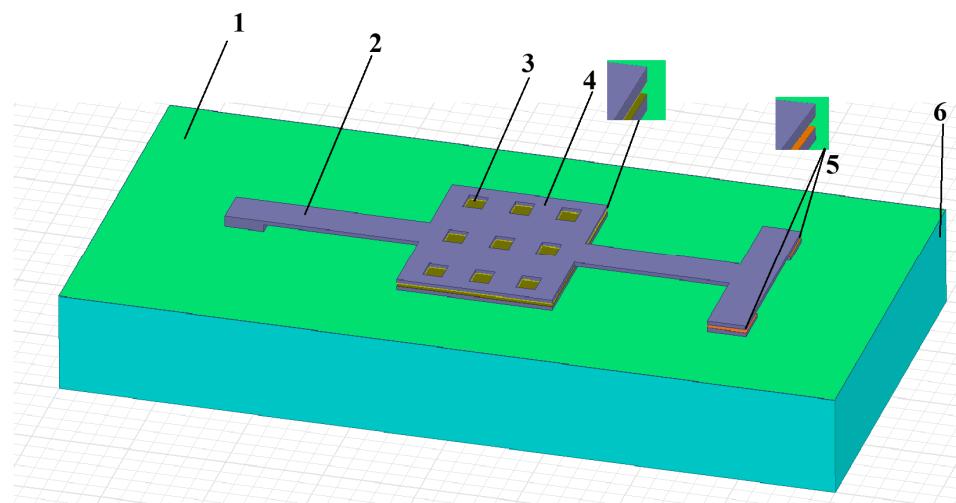


Рис. 1. МЭМС-переключатели с резистивными контактами типа «металл–металл» (1 – диэлектрический слой, 2 – балка, 3 – отверстия, 4 – контактная площадка, 5 – линии передачи, 6 - подложка)

Каждый датчик в зависимости от важности, их количества, входных характеристик (указываются в самом датчике) будет выполнять определенные задачи. Совместное исполь-

зование групп датчиков предлагается разделять на микропроцессы с помощью микроконтроллеров.

Для реализации оценки эффективности внедрения технологии интернета вещей в интегрируемой системе был создан механизм под управлением платформы 1С. В разработанном ПО созданы такие элементы как пользователи, подразделения, задачи пользователей и подразделений, а также данные по датчикам, элементам сети, задачам микроконтроллеров и т.д.

МЭМС-переключатель с резистивными контактами типа «металл–металл» содержит контактную площадку (4) для подачи управляющего напряжения. Под действием этого напряжения балка (2) смещается вниз, замыкая контакт с металлической контактной контактной линии передачи, соединяя её концы. Это позволяет сигналу проходить через оба конца линии передачи (5). Когда управляющее напряжение отключается, балка возвращается в исходное положение, размыкая оба конца линии передачи, в результате чего передача сигнала прекращается.

Качество данного переключателя может быть охарактеризовано емкостью в отключенном состоянии,  $C_t$  (т.е. емкостью, когда балка поднята), и сопротивлением в включенном состоянии,  $R_s$  (т.е. последовательным сопротивлением при замкнутых контактах). Эти два параметра могут быть выражены следующим образом [1,2].

$$C_t = C_p + \frac{\epsilon_0 A_c}{g_0} \quad (1)$$

и

$$R_s = \frac{4 \cdot \rho K}{3 \cdot \pi a_{\phi\phi}}, \quad (2)$$

где  $A_c$  – общая площадь контакта контактной пары;

$g_0$  – открытый зазор между контактами;

$C_p$  – паразитная емкость между переключателем и линией передачи;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость свободного пространства;

$K$  – коэффициента жесткости пружины;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление;

$a_{\phi\phi}$  – эффективный радиус контакта.

Механическое движение разработанной конструкции балки зависит от коэффициента жесткости пружины. Коэффициент жесткости пружины ( $K$ ) балки определяется модулем Юнга ( $E$ ) и длиной балки ( $l$ ) и выражается следующим образом.

$$K = 32Ew\left(\frac{t}{l}\right)\left(\frac{27}{49}\right) + 8\sigma(1-\nu)w\left(\frac{t}{l}\right)\left(\frac{3}{5}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma$  – плоскостное напряжение,  $t$  и  $w$  – соответственно толщина и ширина балки,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Данный переключатель спроектирован на кремниевой подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 11,9 и толщиной 50 мкм. Следующий диэлектрический слой 1 (рис.1) состоит из нитрида кремния с относительной диэлектрической проницаемостью 7 и толщиной 0,2 мкм. Материал балки — золото, покрытое слоем нитрида кремния. Линия передачи и контактная площадка также выполнены из золота. Воздушный зазор между нижним и верхним электродом составляет 1,5 мкм. Геометрические размеры предлагаемого переключателя приведены в таблице 3. Для повышения эффективности переключения, снижения массы балки и уменьшения демпфирования давления воздуха на верхнем электроде балки создаются отверстия небольшого диаметра.

Таблица 2. Геометрические параметры МЭМС переключатели

Параметры	Значение	Параметры	Значение
Толщина подложки (мкм)	50	Толщина срабатываемой накладки (мкм)	2
Диэлектрическая проницаемость подложки	11.9	Толщина нижней металлической контактной площадки (мкм)	2
Размер контактной площадки (мкм*мкм)	100*80	Диэлектрическая проницаемость нитрата кремния	7
Отверстия в балке (мкм*мкм)	10*12	Воздушный зазор, $g_0$ (мкм)	1.5

### Обзор перспективных методов и алгоритмов оптимизации

*Генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA).* GA представляет собой эволюционную оптимизационную технику, основанную на принципах естественного отбора [9]. Решение задачи представляется в виде хромосомы, а параметры решения – в виде генов. Изначально создается популяция хромосом, после чего с использованием функции пригодности (например, потери на включение или изоляция в проектировании переключателей) выбираются лучшие особи, которые выступают в роли родителей. Далее происходит генерация потомков с помощью операций «скрещивание» и «мутация». На последнем этапе применяется схема эллинистической замены, при которой сравниваются все индивиды в популяции и их потомки, и сохраняются лучшие решения. Алгоритм завершается после выполнения заданного количества итераций. Генетический алгоритм может быть применен к широкому кругу задач, как простых, так и сложных, но иногда нахождение оптимального решения может занять значительное время.

*Квази-ニュтоновский метод (Quasi-Newton).* Квази-ニュтоновский метод является итерационным численным методом, используемым для нахождения нулей функций, а также локальных максимумов и минимумов. Этот подход представляет собой усовершенствованную версию метода Ньютона, в которой вместо точного вычисления матриц Якоби или Гессе используется их приближенная аппроксимация, обновляемая на каждой итерации. Это позволяет существенно снизить вычислительную сложность и избежать необходимости работы с матрицами большой размерности, что особенно важно для многомерных задач. Квази-ニュтоновские методы применяются в тех случаях, когда вычисление точных производных невозможно или экономически нецелесообразно. Среди наиболее известных реализаций этого метода можно выделить алгоритмы BFGS (Брайдена–Флетчера–Голдфарба–Шанно) и DFP (Дэвидона–Флетчера–Паузлла), которые успешно применяются в задачах оптимизации гладких функций. Основное преимущество квази-ニュтоновского метода заключается в его высокой скорости сходимости и эффективности при решении задач большой размерности.

*Метод Хука-Джисса (Pattern Search, PS).* Это прямой метод оптимизации, который не требует вычисления градиента целевой функции [10]. Он особенно эффективен для задач, где функция не дифференцируема или даже разрывна. Алгоритм выполняет поиск минимума, проверяя значения функции в наборе точек (сетка) вокруг текущей точки. Если среди точек сетки находится точка с меньшим значением функции, она становится новой текущей точкой для следующей итерации. В случае, если улучшение не найдено, размер сетки уменьшается для более точного поиска вблизи текущей точки. Благодаря своей скорости и надежности, метод часто используется в задачах многокритериальной оптимизации, включая проектирование микропереключателей.

### Результаты моделирование МЭМС-переключателя

Разработанный переключатель был промоделирован как в замкнутом, так и в разомкнутом состоянии. S-параметры данного МЭМС-переключателя, такие как коэффициент отражения S11 (рис. 2, а; рис. 3, а), коэффициент передачи (рис. 2, б) и изоляция S21 (рис. 3, б) были рассчитаны в диапазоне частот от 0,1 до 50 ГГц, как показано на рисунках 2–3. В замк-

нутом положении металлическая часть балки соединяет два порта линии передачи, а в разомкнутом — разрывает их.

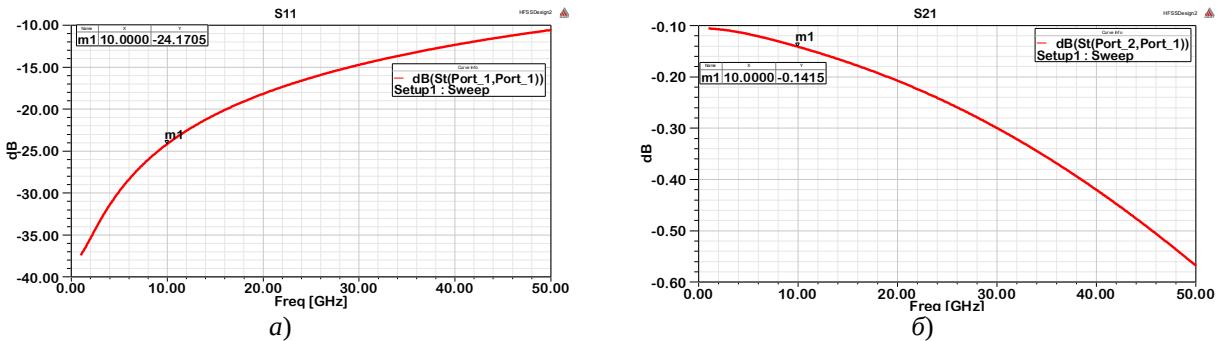


Рис. 2. S-параметры МЭМС-переключателя в замкнутом состоянии

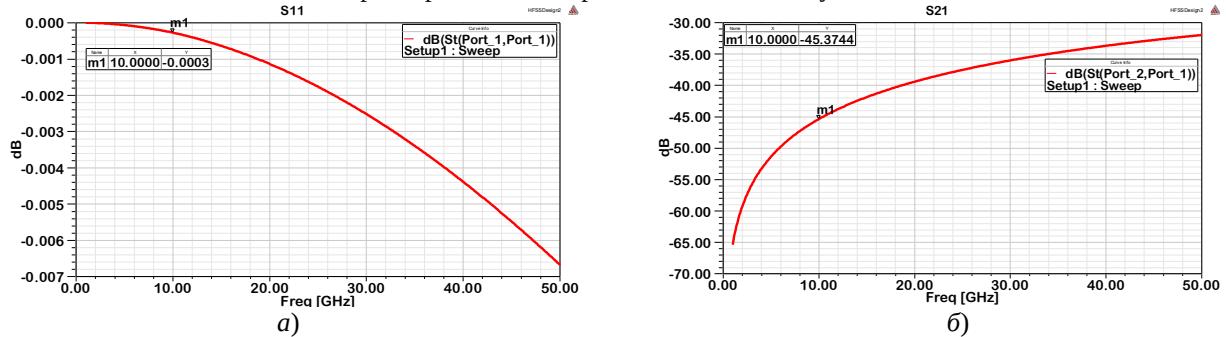


Рис. 3. S-параметры МЭМС-переключателя в разомкнутом состоянии

*Оптимизация в замкнутом положении.* В данном случае процесс оптимизации проектирования МЭМС-переключателя с резистивными контактами типа «металл–металл» осуществляется путем изменения одновременно длины L и ширины W нижней металлической контактной площадки линии передачи 5 (рис.1) в замкнутом положении. Эти параметры контактных площадок изменяются одновременно для достижения оптимальной производительности. Для выполнения оптимизации используются три метода: *метод Хука-Джисса*, *генетический алгоритм* и *квази-ニュтоновский метод*. Эти методы применяются для поиска оптимальных значений параметров конструкции с целью улучшения характеристик и эффективности работы МЭМС-переключателя.

Целевую функцию, учитывающую физические принципы функционирования переключателя, определим соотношением:

$$F = \sum_{i=1}^p \left\{ a_i Y_1^+(f_i) + b_i [\Delta_Y - Y_1^-(f_i)]^2 + c_i [Y_2^+(f_i) - 1]^2 + d_i [Y_2^-(f_i) - 1]^2 \right\}, \quad (4)$$

где  $Y_1^+(f_i)$ ,  $Y_1^-(f_i)$  – функции рабочего затухания в режиме пропускания и запирания соответственно;

$Y_2^+(f_i)$ ,  $Y_2^-(f_i)$  – функции коэффициентов стоячей волны в режиме пропускания и запирания соответственно;

$a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  – весовые коэффициенты;

$\Delta_Y$  – величина заведомо большая  $Y_1^-(f_i)$ .

Физические размеры при оптимизации должны быть ограничены, чтобы избежать слишком больших размеров относительно длины волны, поэтому устанавливаются ограничения: ( $5 \text{ мкм} \leq (L = \text{длина}) \leq 40 \text{ мкм}$ ) и ( $5 \text{ мкм} \leq (W = \text{ширина}) \leq 20 \text{ мкм}$ ).

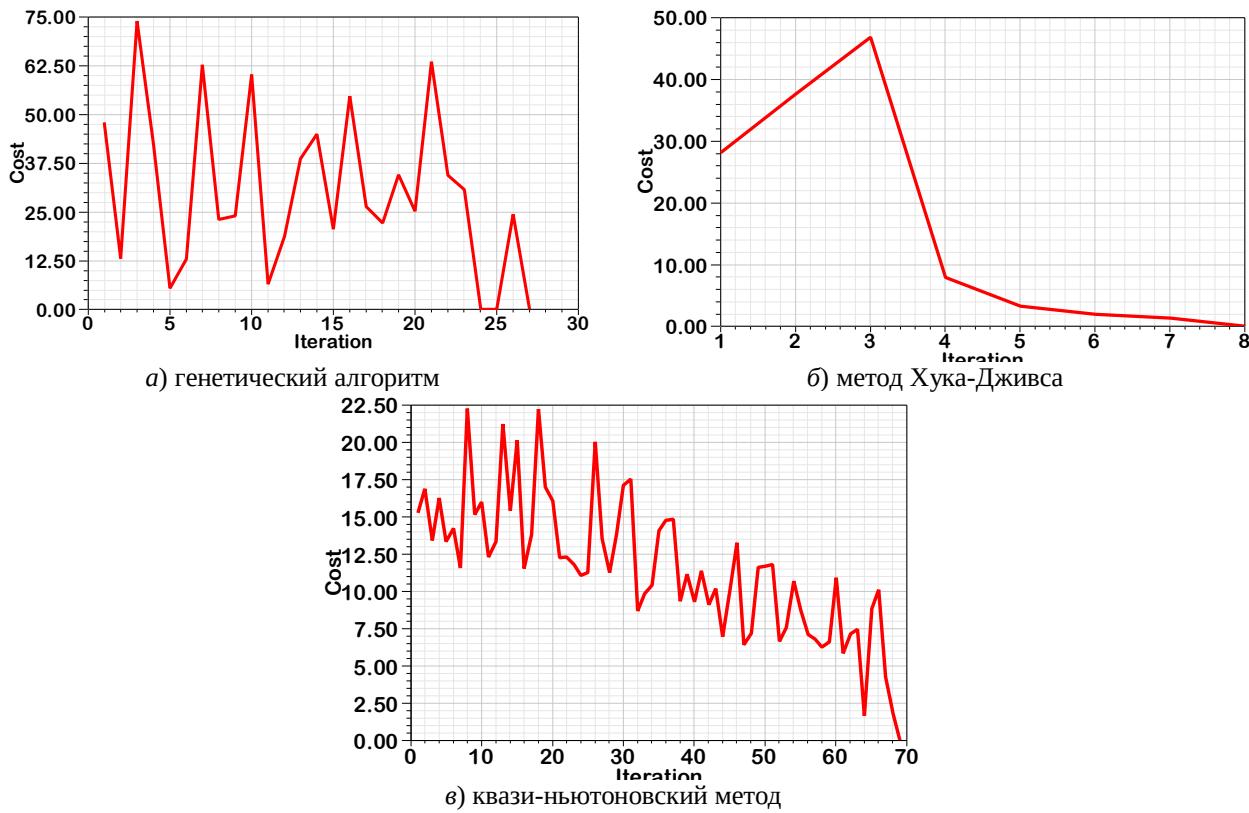


Рис. 4. Скорость сходимости в замкнутом положении

На рисунке 4 представлена скорость сходимости 3-х методов оптимизации при замкнутом положении контакт-детали. На рисунке 4, а представлен результат оптимизации по генетическому алгоритму, на рисунке 4, б – по методу Хука-Дживса, на рисунке 4, в – по квази-ньютоновскому методу. Результаты оптимизации параметров МЭМС-переключателя в замкнутом положении показаны в таблице 3.

Таблица 3. Результаты оптимизации параметров МЭМС-переключателя в замкнутом положении

	Без оптимизации	Метод Хука-Дживса	Генетический алгоритм	Квази-ньютоновский метод
Коэффициент передачи при замкнутом, дБ	-0.1415	-0.13	-0.1352	-0.1329
Коэффициент отражения при замкнутом, дБ	-24.2	-30.1	-30.4	-30.2
Размер контактной линии передачи, мкм*мкм	20*20	16*8	16.5*7	12.9*8.6
Число итераций	–	8	28	69
Время обработки, с	–	201	565	3450

**Оптимизация в разомкнутом положении.** В разомкнутом положении целевая функция тоже заключается в изменении размеров структуры металлической контактной площадки линии передачи, но для достижения минимальной изоляции от порта 1 к порту 2 (S12). Для выполнения оптимизации тоже используются три метода: *метод Хука-Дживса*, *генетический алгоритм* и *квази-ньютоновский метод*. На физические размеры для целевой функции

также устанавливаются ограничения как и в замкнутом положении контакт-детали:  $5 \text{ мкм} \leq L \leq 40 \text{ мкм}$  и  $5 \text{ мкм} \leq W \leq 20 \text{ мкм}$ .

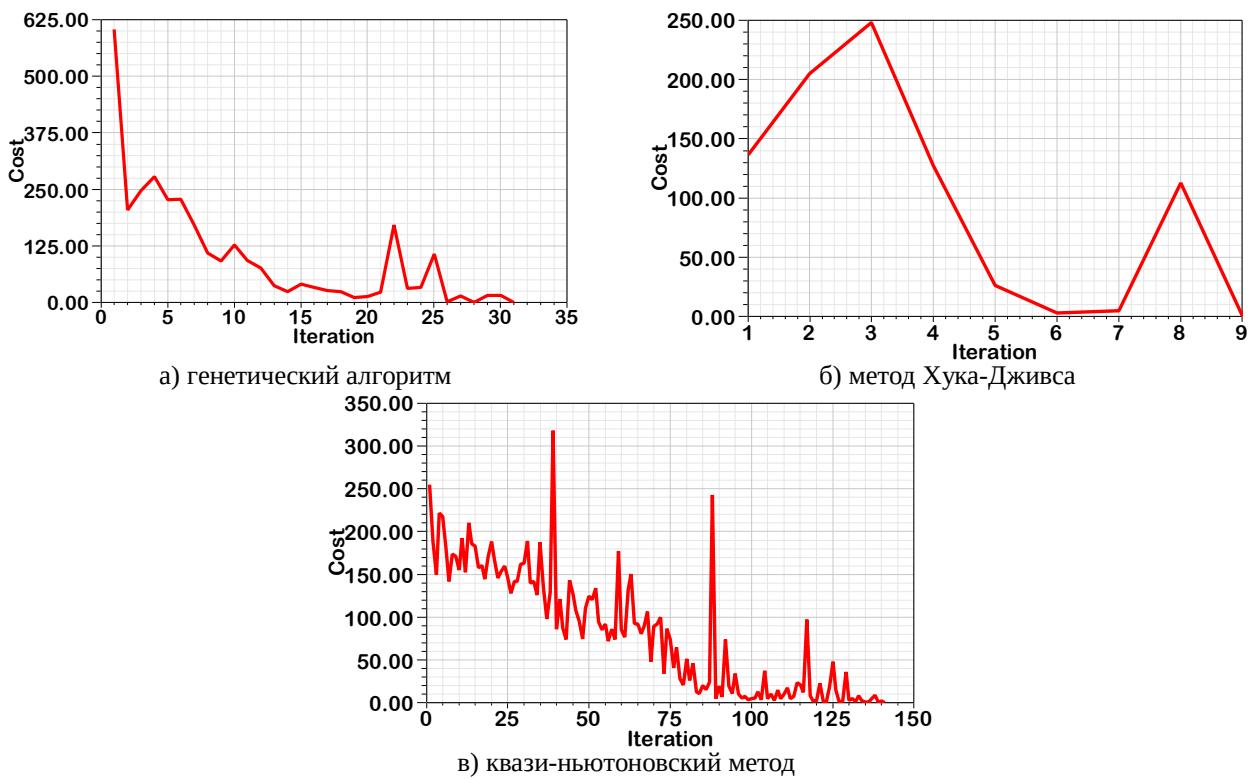


Рис. 5. Скорость сходимости в разомкнутом положении

На рисунке 5 представлена скорость сходимости 3-х методов оптимизации в разомкнутом положении. Результаты оптимизации параметров МЭМС-переключателя в разомкнутом положении показаны в таблице 4.

Таблица 4. Результаты оптимизации параметров МЭМС-переключателя в разомкнутом положении

	Без оптимизации	Метод Хука-Дживса	Генетический алгоритм	Квази-ニュートоновский метод
Изоляция, дБ	-45.4	-62.2	-63.6	-64.2
Размер контактной линии передачи, мкм*мкм	20*20	12*9	10.3*8.1	12.6*10.9
Число итераций	–	9	31	141
Время обработки, с	–	353	976	5293

### Заключение

По результатам оптимизации, в замкнутом, и в разомкнутом состоянии МЭМС-переключателя можно отметить, что квази-ニュートоновский метод чувствителен к выбору начального приближения и в ряде случаев не приводит к положительным результатам, если начальная точка далека от глобального минимума, то математический процесс может потратить много итераций, двигаясь в неверных направлениях.

В отличие от квази-ニュートоновского метода, генетический алгоритм и метод Хука-Дживса лучше справляются с задачами, где начальная точка не играет решающей роли. Оптимизация по предложенной целевой функции показала наилучшие результаты при использовании метода Хука-Дживса при замкнутых контактах (число итераций – 8, коэффициент передачи -0.13 дБ). Таким образом, предложенный подход к оптимизации МЭМС-

переключателя позволяет сократить время на вычислительный процесс и улучшить основные параметры.

### **Библиографический список**

1. Charles E. Free, Colin S. Aitchison. RF and Microwave Circuit Design: Theory and Applications. 2022 John Wiley & Sons Ltd. 531 p.
2. Kurmendra, Rajesh Kumar. A review on RF micro-electro-mechanical-systems (MEMS) switch for radio frequency applications. *Microsystem Technologies*, volume 27, issue 7, pages 2525-2542.
3. Васильев Е.П. Моделирование микроволновых многоканальных переключателей // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №73 . 2020. С. 26-36.
4. Васильев Е.П. Моделирование микрополосковых делителей-сумматоров субмодулей усилителей мощности // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №771.2020. С. 23-33
5. Garg A, Chawla P, Khanna R. A Novel Approach of RF MEMS Resistive Series Switch for Reconfigurable Antenna. In: Proceedings of Annual IEEE Int. Conf. on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy; 4–6 June 2013; Kanjirapally: 2013. pp. 1–6.
6. Paolo Di Barba • Slawomir Wiak. MEMS: Field Models and Optimal Design. 2020. 573 p.
7. Yeung SH, Man KF. Multiobjective optimization. *IEEE Microwave Magazine*. 2011; 12(6): 120–133. doi:10.1109/mmm.2011.942013
8. Razavi A, Forooraghi K. Thinned arrays using pattern search algorithms. *Progress in Electromagnetics Research*. 2008; 78: 61–71. doi:10.2528/pier07081501
9. Васильев Е.П, Нгуен Д.Х. Анализ численными методами конструктивных вариантов миниатюрных радиарных резонансных элементов. Вестник РГРТУ. № 84, 2023, с. 3-14.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

### **АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ЧАСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОПОРНЫХ ДАННЫХ**

**В.В. Родина, А.С. Рыжиков**

*Rязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, rodina2017g@yandex.ru*

**Аннотация.** В работе рассматриваются протоколы доступа к опорным данным при клиент-серверном взаимодействии, а так же асинхронный алгоритм визуализации полученных данных. Представлены описания протоколов и рекомендации по использованию наиболее подходящего протокола для визуализации опорного растрового покрытия при интерактивной работе. Приводится схема индексации тайлов в виде пирамиды масштабов. Рассмотрен алгоритм асинхронного запроса и визуализации опорных данных и представлена схема обработки запросов опорных данных. Так же в работе учтены возможные ошибки при клиент-серверном взаимодействии и их обработка.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), центр обработки данных (ЦОД), тайловая карта, клиент-сервер.

### **ALGORITHMIC SUPPORT OF THE EARTH REMOTE SENSING DATA PROCESSING COMPLEX IN TERMS OF VISUALIZATION OF REFERENCE DATA**

**V.V. Rodina A.S. Ryzhikov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, rodina2017g@yandex.ru*

**The summary.** The paper discusses protocols for accessing reference data during client-server interaction, as well as an asynchronous algorithm for visualizing the received data. Protocol descriptions and recommendations for using the most appropriate protocol for visualizing the reference raster coverage during interactive work are presented. There is also a scheme for indexing tiles in the form of a pyramid of scales. An algorithm for asynchronous query and visualization of refer-

ence data is considered and a scheme for processing reference data requests is presented. The work also takes into account possible errors during client-server interaction and their processing.

*Keywords:* remote sensing of the Earth, data center (DC), tile map, client-server.

Современная тенденция развития систем ДЗЗ связана с переходом к полностью автоматическому потоковому созданию стандартных продуктов от серийных КА. Однако ряд периодически проводимых технологических операций (например, калибровочные мероприятия, разбор сбоев) связаны с работой квалифицированного оператора в интерактивном режиме. В связи с этим программный комплекс стандартной обработки данных ДЗЗ в технологическом режиме должен обеспечивать интерактивный доступ к опорным данным, включая непрерывное опорное растровое покрытие.

Целью работы является разработка алгоритмического обеспечения комплекса стандартной обработки в части визуализации опорного растрового покрытия. Опорные данные обычно предоставляются отдельным сетевым сервисом, доступным по высокоскоростной внутренней сети ЦОД, поэтому в работе необходимо решить следующие задачи:

- выбрать протокол взаимодействия с сервисом предоставления опорных данных;
- предложить алгоритм извлечения и визуализации опорных данных, обеспечивающий интерактивное взаимодействие с пользователем с малой задержкой ввода-вывода;
- организовать обработку ошибок сетевого и прикладного уровня.

### **Протокол доступа к опорным данным**

Существует несколько известных протоколов доступа к опорным данным в картографической проекции.

Протокол Web Map Tile Service (WMTS) и его расширения (WMS-C) позволяют запрашивать фрагменты непрерывного растра с произвольными размерами и в заданном клиентской стороной формате. [1] WMTS рекомендован Open Geospatial Consortium для отображения динамических, часто изменяющихся данных и в случаях, когда желателен перенос вычислительно сложных операций на сервер. Однако накладные затраты на стороне сервера для обслуживания запросов высоки, т.к. генерация растров запрошенных фрагментов и их кодирование в общем случае происходит в момент обработки запроса.

Протокол Tile Map Service (TMS) обеспечивает доступ к тайлам (фрагментам фиксированного размера) непрерывного растра [2]. Тайлы организованы в регулярную двумерную сетку и представлены в виде пирамиды масштабов. На каждом последующем уровне масштаба детализация (пространственное разрешение) растра увеличивается вдвое. За счет фиксированного формата и размера тайлов поддержка этого протокола проста в реализации как на сервере, так и на клиенте. Обслуживание запроса на доступ к тайлу по протоколу TMS обычно сводится к выдаче заранее подготовленного файла из хранилища данных. Время ответа сервера определяется главным образом скоростью ввода-вывода дисковой подсистемы (I/O-bound задача), что позволяет обслуживать множество клиентов одновременно, не предъявляя при этом высоких требований к мощности ЦП.

TMS специфицирует несколько REST API запросов, позволяет получать тайлы, информацию о доступных картографических проекциях, тематических слоях, уровнях масштаба. Эта дополнительная информация важна для случаев, когда сервер поддерживает различные проекции, источники данных и т.п.

Для визуализации опорных данных с малой задержкой (*latency*) TMS предпочтительнее WMTS, т.к. за счет строгой структуры организации тайлов обеспечивает меньшее время ответа на запрос и одновременно большую пропускную способность (*throughput*). Заметим, что картографические web-сервисы, такие как GoogleMaps и OpenStreetMap, поддерживают упрощенный протокол TMS – XYZ (GoogleMapsTiles), согласно которому сервер реализует обслуживание единственного обязательного запроса: доступ к тайлу уровня масштаба z с ко-

ординатами ( $x, y$ ). Параметр  $x$  определяет положение тайла по горизонтальной оси (номер столбца тайловской сетки),  $y$  – по вертикальной оси (номер строки). Схема индексации тайлов приведена на рисунке 1.

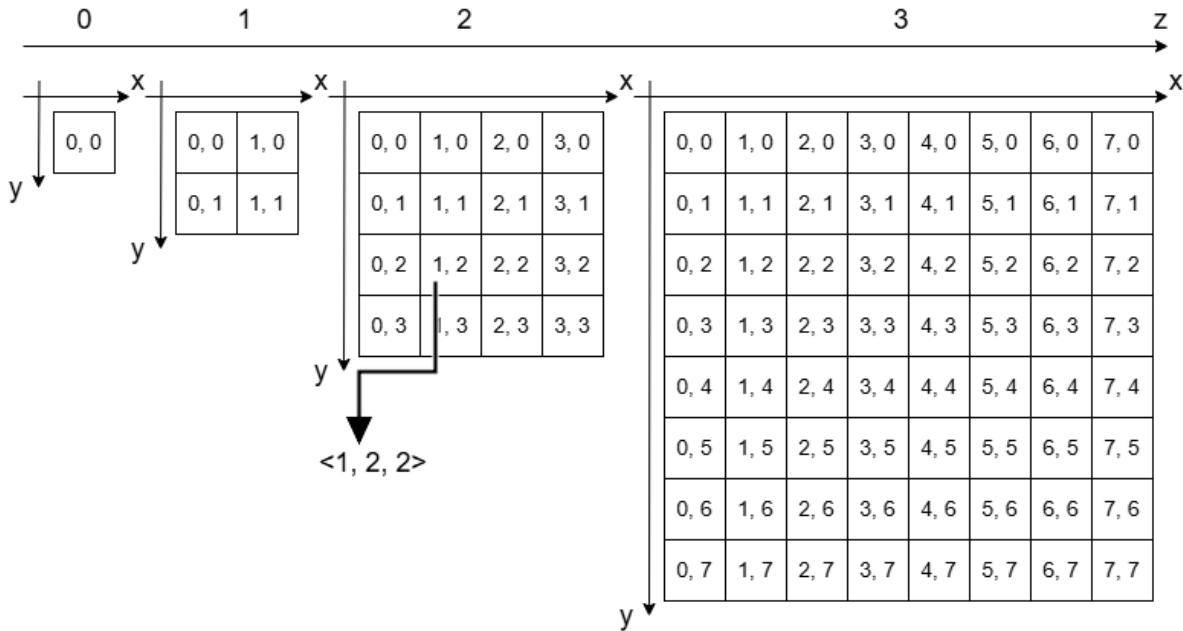


Рис. 1. Представление тайловой карты

Для визуализации опорных данных в комплексе стандартной обработки выберем упрощенный протокол XYZ. URL для доступа к тайлу имеет вид <http://<server>/<layer>/<z>/<x>/<y>>. Здесь <server> – домен сервера, предоставляющего тайлы, <layer> – опциональный идентификатор тематического слоя, <z>, <x>, <y> – уровень масштаба и координаты тайла.

### Алгоритм асинхронной визуализации опорных данных

Простейший алгоритм получения изображения от сервиса опорных данных заключается в последовательном запросе каждого тайла, соответствующего области просмотра пользователя, непосредственно в момент визуализации (перерисовки экрана). Недостатком этого алгоритма является визуально заметная задержка при обновлении области просмотра из-за накладных затрат, связанных с декодированием тайлов и передачей данных по сети.

Для скрытия задержки доступа к тайлам рекомендован асинхронный алгоритм визуализации. Перед началом рендеринга сцены необходимо отправить запросы на получение данных, отсутствующих в кэше тайлов. Ожидание ответа от сервера и декодирование растра тайла осуществляется асинхронно в отдельном потоке. Схема обработки запроса представлена на рисунке 2.

Основной поток, в котором выполняется рендеринг сцены, проверяет наличие необходимого тайла для отрисовки в кэше. В случае отсутствия формируется URL-запрос, в котором кодируется индекс тайла. Далее запрос передается на обработку, а основной поток возвращается к выполнению задач рендеринга.

Поток обработки запросов создается при инициализации источника данных и обрабатывает полный цикл обработки запросов: отправку, ожидание ответа, декодирование тайлов и помещение их в кэш. После помещения нового тайла в кэш поток обработки отправляет асинхронное сообщение о необходимости начать рендеринг. Для обеспечения потокобезопасности операции с общей памятью организованы как атомарные.

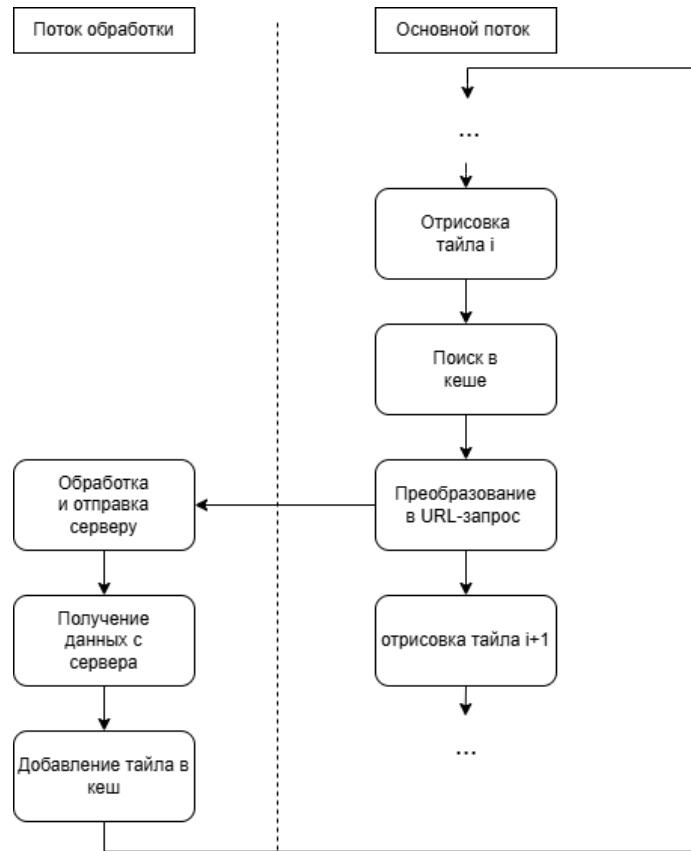


Рис. 2. Схема обработки запроса

Важным вопросом при реализации асинхронного клиент-серверного взаимодействия является обработка ошибок, возникающих на сетевом или прикладном уровне. В частности, возможны ситуации, когда от ответа от сервера не приходит в заданное время, например, из-за загруженности сервера, проблем с обработкой запроса, неправильной маршрутизации. При превышении времени ожидания ответа или разрыве соединения осуществляется повторный запрос данных. Чтобы не создавать лишней нагрузки на сервер, новые запросы отправляются с экспоненциально возрастающей задержкой, а количество повторных запросов на сервер ограничено.

В случае правильной обработки запроса сервером происходит асинхронное оповещение основного потока о необходимости повторного рендеринга сцены. Однако это требует взаимодействия с памятью, общей для основного потока и потока обработки, что может привести к непредсказуемому поведению.

### Заключение

Проведен анализ известных протоколов доступа к опорным данным при клиент-серверном взаимодействии. Рекомендовано использовать упрощенный протокол TMS (XYZ) для визуализации опорного растрового покрытия при интерактивной работе. Предложен алгоритм асинхронного запроса и отображения тайлов, который позволяет обеспечить взаимодействие с пользователем с малой задержкой ввода-вывода.

### Библиографический список

1. WMS -- Web Map Services. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<https://gdal.org/en/stable/drivers/raster/wms.html#wms-web-map-services>
2. Tile Map Service Specification. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
[https://wiki.osgeo.org/wiki/Tile\\_Map\\_Service\\_Specification](https://wiki.osgeo.org/wiki/Tile_Map_Service_Specification)

УДК 621.372.8.049; ГРНТИ 47.41.29

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ

Е.П. Васильев, Лыу Тхань Дат

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, evasiliev48@mail.ru*

**Аннотация.** В данной работе рассматривается статистическое моделирование микроволновых фильтров на связанных линиях. Получены соотношения функций плотности распределения параметров АЧХ полосовых фильтров.

**Ключевые слова:** статистическое моделирование, полосовой фильтр, метод вероятностного моделирования, функции плотности распределения.

## STATISTICAL MODELING OF COUPLED LINE MICROWAVE FILTERS

E.P. Vasilyev, Luu Thanh Dat

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, evasiliev48@mail.ru*

**The summary.** This paper discusses statistical modeling of coupled line microwave filters. The ratios of the distribution density functions of the frequency response parameters of bandpass filters are obtained.

**Keywords:** statistical modeling, bandpass filter, probabilistic modeling method, distribution density functions.

### Введение

Теория и практика фильтров на связанных линиях разработана достаточно хорошо [1,7,8]. Однако целесообразно на первом этапе моделирования полосовых фильтров (ПФ) оценить основные вероятностные характеристики. Поэтому целью данной работы является полученные в явном виде соотношений для функции плотности распределения потерь в полосе пропускания и заграждения, ширины полосы пропускания и заграждения, а также для резонансной частоты.

На основании метода вероятностного моделирования и алгоритма анализа фильтров на связанных линиях (СЛ) с учетом дестабилизирующих факторов, разработанного для конкретных конструкций ПФ можно получить функции плотности распределения вносимого ослабления  $f(L)$  и коэффициента отражения  $f(\Gamma)$ . Затем для выбранных вариантов технологических процессов и заданных допусках на конструктивные параметры на фиксированных частотах рассчитываются толерантные пределы выходных характеристик  $L$  и  $\Gamma$ .

При разработке ПФ используются различные способы задания требований к их характеристикам. Так, например, для фиксированных значений ширины полосы пропускания  $V_{\Pi}$  и ширины полосы заграждения  $V_s$  регламентируются максимальные потери в полосе пропускания  $a_{\Pi \max}$  или минимальные потери в полосе заграждения  $a_{s \min}$ . Распространены также требования к коэффициенту прямоугольности  $K_{\Pi}$  и  $V_{\Pi}$ . Поэтому для оценки допусков и вероятности выхода годных изделий важно определить функции плотности распределения для рассматриваемых параметров [1].

**Потери в полосе пропускания  $a_{\Pi}$  и заграждения  $a_s$ .** Функцию вносимого ослабления запишем в виде:

$$L = \Psi(\bar{k}, f), \quad (1)$$

где  $\bar{k}$  – вектор номинальных конструктивных параметров ПФ;  $f$  – частота.

Тогда потери в полосе пропускания и заграждения:

$$a_{\Pi} = \Psi(\bar{k}, f_{\Pi}) \text{ и } a_3 = \Psi(\bar{k}, f_3), \quad (2)$$

где  $f_{\Pi}$  – частоты в полосе пропускания по уровню  $a_{\Pi_{\max}}$ ;

$f_3$  – частоты в полосе заграждения по уровню  $a_{3_{\min}}$ .

Тогда на основании формулы Гаусса и предельной теоремы теории вероятности [3] получим:

$$f(a_{\Pi}) = \frac{1}{\sigma[a_{\Pi}] \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[a_{\Pi} - M[a_{\Pi}]]^2}{2\sigma^2[a_{\Pi}]}\right\}, \quad (3)$$

$$f(a_3) = \frac{1}{\sigma[a_3] \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[a_3 - M[a_3]]^2}{2\sigma^2[a_3]}\right\}, \quad (4)$$

где  $a_{\Pi}$  – потери в полосе пропускания;

$a_3$  – потери в полосе заграждения;

$\sigma[a_{\Pi}]$  – погрешность потерь в полосе пропускания;

$\sigma[a_3]$  – погрешность потерь в полосе заграждения;

$M[a_{\Pi}]$  – математическое ожидание  $a_{\Pi}$ ;

$M[a_3]$  – математическое ожидание  $a_3$ .

**Ширина полосы пропускания  $V_n$ .** Для получения закона распределения параметра АЧХ  $V_n$  воспользуемся эмпирической функцией [2]:

$$\frac{a}{n} = \left( \frac{8,68 \sum_{i=1}^n Q_i S}{n Q_o} \right) \frac{100}{V_{\Pi}}, \quad (5)$$

где  $n$  – число резонаторов;

$Q_i$  – нагруженная добротность  $i$ -го идеального резонатора;

$Q_o$  – собственная добротность резонатора;

$a$  – потери на центральной частоте  $f_p$ :  $S = \frac{2\Delta f}{f_p} = V_{\Pi}/100$ .

Приведенная зависимость (5) является гиперболой, т.к. выражение в скобках, как показано в работе [2], достаточно постоянно. Так как функция плотности распределения  $f(a)$  известна, можно записать [3]:

$$f(V_{\Pi}) = f[\Psi(V_{\Pi})][\Psi'(V_{\Pi})], \quad (6)$$

где  $a = \Psi(V_{\Pi}) = \frac{c_a n}{V_{\Pi}}$ . Тогда с учетом (5) и (6) получим [9]:

$$f(V_{\Pi}) = \frac{1}{\sigma[a] \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\left[\frac{c_a n}{V_{\Pi}} - M[a]\right]^2}{2\sigma^2[a]}\right\} \frac{c_a n}{V_{\Pi}^2}, \quad (7)$$

$$\text{где } c_a = 100 \left\{ \frac{8,68 \sum_{i=1}^n Q_i S}{n Q_o} \right\}.$$

**Резонансная частота  $f_p$ .** Необходимо определить функцию плотности распределения  $f(f_p)$ . Для этого воспользуемся выражением  $V_n = \frac{2\Delta f}{f_p} 100$ , отсюда с учетом (7) определим условную плотность распределения  $f(f_p | \Delta f)$ , исходя из соотношения:

$$f(f_p | \Delta f) = f[\Psi(f_p)][\Psi'(f_p)], \quad (8)$$

$$\text{где } \Psi(f_p) = \frac{200\Delta f}{f_p}.$$

В результате соответствующих преобразований, получим:

$$f(f_p | \Delta f) = \frac{1}{\sigma[a]\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\left[ \frac{c_a n f_p}{200\Delta f} - M[a] \right]^2}{2\sigma^2[a]} \right\} \frac{c_a n f_p^2}{200\Delta f V_n^2}. \quad (9)$$

**Ширина полосы заграждения  $V_3$ .** Известно [2], что оптимальные значения коэффициентов прямоугольности с точки зрения обеспечения минимального значения  $a_n$ , равны  $K_n^* = 1,8$  для чебышевской АЧХ и  $K_n^* = 2,7$  для максимально-плоской АЧХ. Тогда, подставляя  $V_n = \frac{V_3}{K_n^*}$  в формулу (5), найдем:

$$\frac{a}{n} \frac{V_3}{K_n^*} = c_a, \quad \text{отсюда} \quad V_3 = \frac{K_n^* n c_a}{a}. \quad (10)$$

По аналогии с соотношением (6) запишем условную плотность распределения

$$f(V_3 | K_n^*) = f[\Psi(V_3)][\Psi'(V_3)], \quad (11)$$

$$\text{где } a = \Psi(V_3) = \frac{K_n^* n c_a}{V_3}.$$

С учетом (10) и (11) получим:

$$f(V_3 | K_n^*) = \frac{1}{\sigma[a]\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\left[ \frac{K_n^* n c_a}{V_3} - M[a] \right]^2}{2\sigma^2[a]} \right\} \frac{K_n^* n c_a}{V_3^2}. \quad (12)$$

Таким образом, для расчета функций плотности распределения, рассмотренных выше параметров АЧХ, необходимо определить математическое ожидание и дисперсию  $L$  на частотах  $f_p$ ,  $f_3$  и  $f_n$ .

Отметим особенности, которые учитывались при анализе ПФ вероятностным методом:

- Нормальный закон распределения возникает во всех случаях, когда исследуемая случайная величина может быть представлена суммой независимых (или слабо зависимых) элементарных слагаемых, каждое из которых в отдельности мало влияет на сумму. Данный вывод можно сделать для случайных величин  $w_i, s_i, \ell_i, h, \varepsilon$ , т.к. в процессе технологического изготовления ПФ и подложек на точность их параметров воздействует огромное количество факторов, известных и не известным нам. Данное утверждение подтверждается экспериментальными исследованиями [3, 4-6].

- Необходимо учитывать корреляционную связь между конструктивными размерами  $w_i, s_i$  и  $\ell_i$  с коэффициентами корреляции  $R_{w_i, s_i} = -1; R_{w_i, \ell_i} = 1; R_{s_i, \ell_i} = -1$ .

Учитывая, что  $M/L$  соответствует АЧХ, полученной для номинальных конструктивных параметров, нетрудно определить функции плотности распределения основных параметров АЧХ, толерантные пределы и соответствующие вероятности годности [10-11].

На рис. 1 приведены вероятностные параметры партии ПФ при совокупном воздействии регулярных погрешностей. Вероятность нахождения  $a_n$  в заданном интервале позволяет оценить график, приведенный на рисунке 1,б. На рисунке 1,а приведена функция плотности распределения  $f(V_n)$ . Ожидаемый процент выхода годных при допусках на  $a_n, V_n, V_3 - 2\%, 5\%$  и  $10\%$  приводится на рисунке 2.

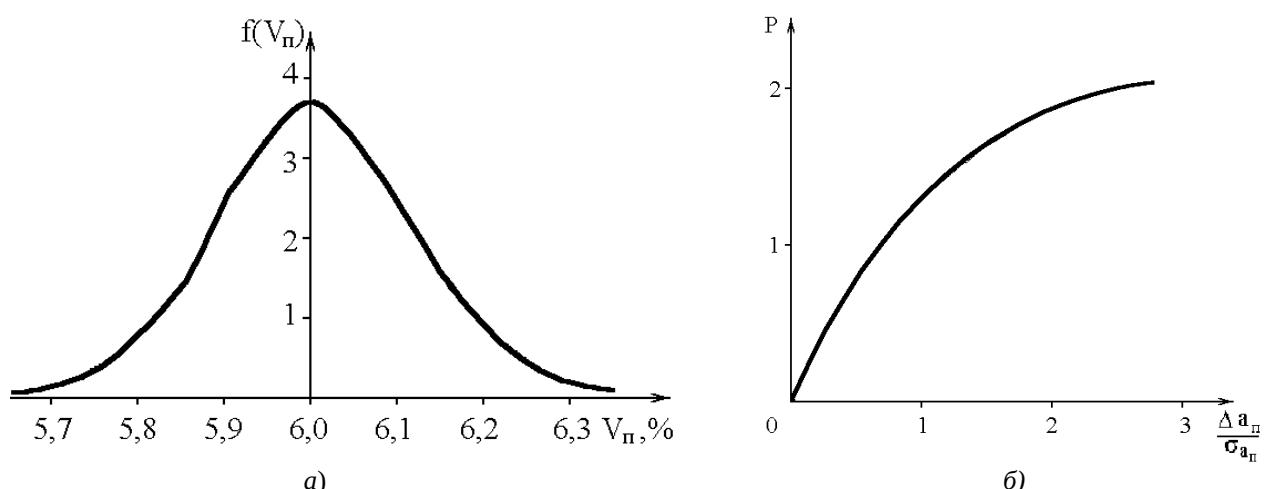


Рис. 1. Вероятностные параметры партии ПФ на СМПЛ при совокупном воздействии регулярных погрешностей

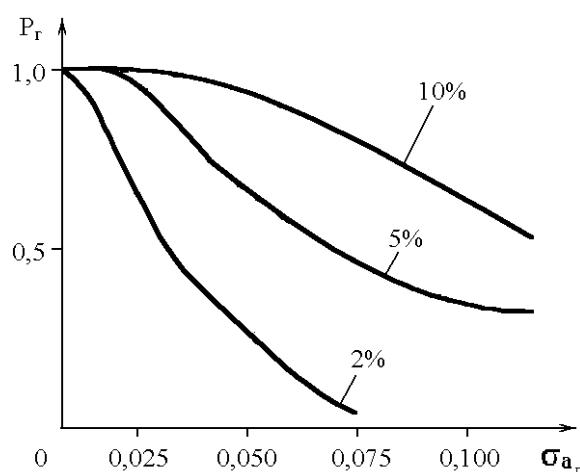


Рис. 2. Ожидаемый процент выхода годных при допусках на  $a_n, V_n, V_3 - 2\%, 5\%$  и  $10\%$

Результаты проведенных расчетов показывают, что законы распределения функции плотности распределения основных параметров АЧХ незначительно отличаются от нормального.

### **Заключение**

Полученные функции плотности распределения основных параметров АЧХ микроволновых ПФ позволяют оперативно на начальном этапе процесса проектирования установить допуски и оценить вероятность выхода годных изделий.

### **Библиографический список**

1. Захарьящев Л.И., Васильев Е.П., Алымов В.Н. Влияние дестабилизирующих факторов на параметры миниатюрных фильтров СВЧ // Всесоюзный НТС. Пути повышения стабильности и надежности микроэлементов и микросхем. Рязань 22-24 сентября 1976. Тезисы докладов. М. 1976. (ДСП). С. 39-40.
2. Справочник по элементам полосковой техники / О.И Мазепова., В.П. Мещанов, Н.И. Прохорова, А.Л Фельдштейн, Л.Р Явич; Под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979. 336 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.
4. Васильев Е.П. Оценка погрешностей параметров диэлектрических подложек и микрополосковых фильтров // Микроминиатюризация радиоэлектронных устройств: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань, РРТИ. Вып.1. 1979. С. 94-96.
5. Васильев Е.П. Исследование конструкций микрополосковых фильтров на связанных линиях с учетом технологических погрешностей. Диссертация на К.Т.Н., Москва. МИЭМ, 1980. (ДСП). 197 с.
6. Захарьящев Л.И., Васильев Е.П., Алымов В.Н. Оценка факторов влияющих на параметры микрополосковых линий // Всесоюзный НТС. Пути повышения стабильности и надежности микроэлементов и микросхем. Рязань 22-24 сентября 1976. Тезисы докладов. М. 1976, (ДСП). С. 38.
7. Васильев Е.П. Анализ методов моделирования микроволновых устройств на примере полосового фильтра с расширенной полосой заграждения // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. № 72. 2020. С. 62-70.
8. Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп, Лыу Тхань Дат. Полосовой фильтр на связанных микрополосковых линиях с двумя секторными резонаторами // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. № 75. 2021. С. 15-23.
9. Васильев Е.П. Статистический анализ полосовых фильтров на связанных микрополосковых линиях // Миниатюризация СВЧ устройств: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань, РРТИ. 1978. С. 24-28.
10. Васильев Е.П. Моделирование микрополосковых делителей-сумматоров субмодулей усилителей мощности // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. № 71. 2020. С. 23-33.
11. Васильев Е.П. Моделирование микроволновых многоканальных переключателей // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №73. 2020. С. 26-36.

УДК 520.874.3; ГРНТИ 47.43; 47.49

## **ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ БЫСТРОДВИЖУЩИХСЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИХ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ С ЗЕМЛИ: НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ**

**И.Н. Мыльников**

Волгоградский государственный университет,  
Российская Федерация, Волгоград, pmtb-211\_422697@volsu.ru

**Аннотация.** В данной работе рассматривается проблема оценки уровня помех, возникающих при корреляционной обработке сигналов, используемых в радиолокационном зондировании космических объектов с наземных станций сквозь атмосферу. Основным источником помех, согласно рассматриваемой модели, является неоднородность частотной характеристики канала распространения сигнала, обусловленная атмосферными явлениями. Численное моделирование показало, что величина вносимой помехи, выраженная в процентах относительно полезного сигнала, варьируется в диапазоне от незначительных долей процента до нескольких процентов. Эта величина существенно зависит от угла, под которым осуществляется зондирование (зенитного угла), а также от концентрации водяного пара и гидро-

метеоров (таких как капли в облаках, тумане и дожде) в атмосфере. Для минимизации негативного влияния неравномерности частотной характеристики атмосферной трассы предлагается использовать метод предварительной коррекции входного сигнала. Суть метода заключается в применении к входному сигналу линейного фильтра, частотная характеристика которого является обратной по отношению к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) атмосферного канала. Это позволит компенсировать искажения, вносимые атмосферой, и повысить качество обработки принимаемого сигнала.

## THE ACCURACY OF ESTIMATING THE SPEED OF FAST-MOVING SPACE OBJECTS DURING THEIR RADAR SENSING FROM EARTH: THE NEGATIVE IMPACT OF THE FREQUENCY PROPERTIES OF THE EARTH'S ATMOSPHERE

I.N. Mylnikov

*Volgograd State University,  
Russian Federation, Volgograd, pmfb-211\_422697@volsu.ru*

*Abstract.* This paper considers the problem of estimating the level of interference that occurs during correlation processing of signals used in radar sensing of space objects from ground stations through the atmosphere. The main source of interference, according to the considered model, is the heterogeneity of the frequency response of the signal propagation channel due to atmospheric phenomena. Numerical modeling has shown that the amount of interference introduced, expressed as a percentage of the useful signal, varies from small fractions of a percent to several percent. This value significantly depends on the angle at which the sounding is carried out (zenith angle), as well as on the concentration of water vapor and hydrometeors (such as droplets in clouds, fog and rain) in the atmosphere. To minimize the negative impact of the uneven frequency response of the atmospheric route, it is proposed to use the method of preliminary correction of the input signal. The essence of the method is to apply a linear filter to the input signal, the frequency response of which is the inverse of the amplitude-frequency response (frequency response) of the atmospheric channel. This will compensate for the distortion introduced by the atmosphere and improve the quality of the received signal processing.

### **Введение**

Для повышения точности определения ключевых параметров астероидов, представляющих потенциальную опасность для Земли, при их исследовании методом радиолокационного зондирования, предлагается методика одновременного измерения двух параметров: размера объекта, проецируемого на линию визирования, и радиальной скорости, вычисляемой на основе анализа средней частоты спектра отраженного сигнала. Применение широкополосных радиосигналов в данной методике позволяет достичь более высокой эффективности измерения обоих параметров.

Однако, при использовании наземных радиолокационных систем (как показано на рис. 1) возникают дополнительные сложности, связанные с прохождением радиосигналов через атмосферу Земли. Неравномерность частотной характеристики атмосферы, обусловленная различными факторами, вносит погрешности в оценку существенных параметров сигнала. Эта частотная зависимость коэффициента поглощения радиоволн в атмосфере определяется присутствием поглощающих молекул (таких как водяной пар, кислород и т.д.) и различных примесных частиц, а также неравномерным распределением этих компонентов по высоте. Следует также учитывать периодические изменения в поглощении, связанные со сменой времен года, систематические различия в поглощении в зависимости от географической широты и зависимость суммарного поглощения от угла, под которым луч распространяется по отношению к зениту. Все перечисленные факторы оказывают влияние на точность измерений и тщательно анализируются в представленной работе.

В рамках данного исследования проводится оценка отношения ‘сигнал-помеха’ [1], что позволяет определить потенциальную точность измерения целевых параметров. Исполь-

зум подходит, развивающийся в работе [2]. В отличие от [2] в настоящей работе мы уделяем основное внимание роли водяного пара в искажении сигнала.

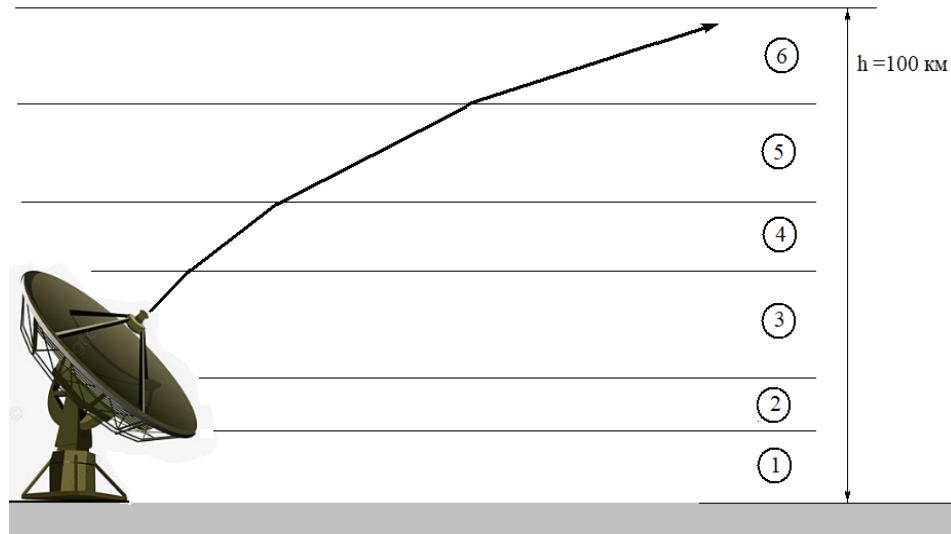


Рис.1. Схематическое представление трассы распространения радиосигнала в атмосфере при радиолокационном зондировании космических объектов. При расчете искажения сигнала атмосфера разбивается на отдельные слои по высоте согласно Рекомендациям МСЭ [3-5].  
Эффективная высота атмосферы принимается равной 100 км.

Основная идея оценки влияния атмосферы на точность измерений заключается в следующем: к функции автокорреляции (АКФ) принимаемого сигнала добавляется аддитивная добавка, обусловленная атмосферными искажениями. Далее, производится оценка этой аддитивной компоненты по ее норме, что позволяет количественно оценить вносимую погрешность. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методов компенсации атмосферных искажений и повышения точности радиолокационных измерений параметров опасных астероидов.

#### **Модель атмосферы и описание результатов расчетов**

На рисунке 2 представлены результаты расчета затухания радиосигнала в атмосфере в зависимости от его частоты для различных состояний атмосферы.

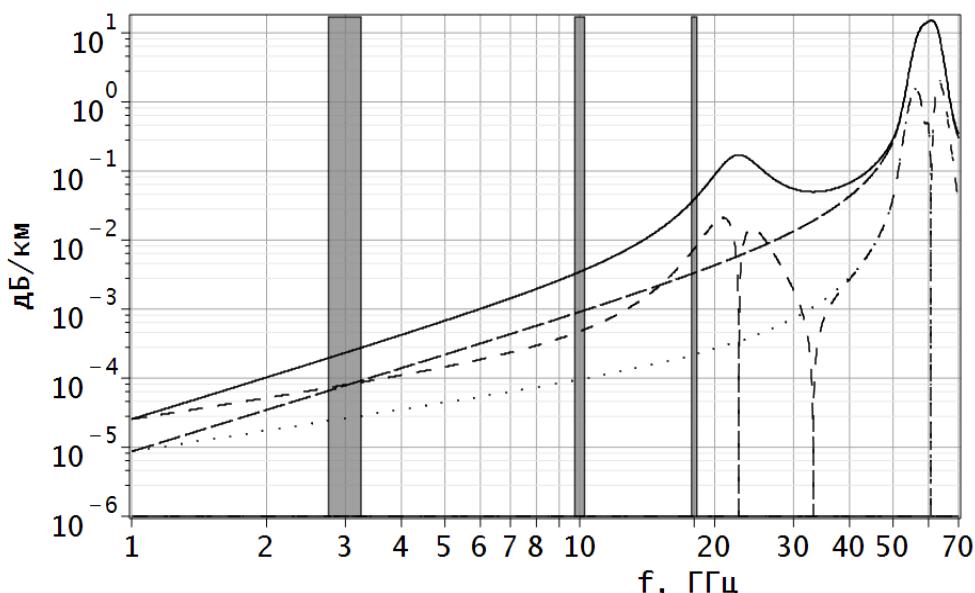


Рис. 2. Зависимость погонного затухания радиосигнала в атмосфере от частоты

Расчеты выполнены на основе моделей, описанных в Рекомендациях МСЭ [3-4], для двух различных состояний атмосферы: стандартной (где концентрация водяного пара у поверхности Земли составляет 7.5 г/м<sup>3</sup> - обозначена сплошной линией) и сухой (обозначена длинным штрихом). Способ расчета и визуализация результатов аналогична принятой в работе [2]. Заливка на графике указывает области шириной  $\Delta f=500$  МГц, соответствующие занимаемой полосе частот сигнала. Отмечены частотные диапазоны, использованные в численных расчетах: 3, 10 и 18 ГГц. Первая поправка, отражающая изменения в затухании,  $|K'_0(f)\Delta f|$  представлена для модели стандартной атмосферы (кислород+водяной пар) разрезенной штриховой линией, для модели сухой атмосферы – пунктирной линией,

Пространственное распределение концентрации поглощающих компонентов атмосферы по высоте (на рассматриваемых частотах: 3, 10 и 18 ГГц (см. рис. 2) определяется текущими атмосферными условиями. Важно отметить, что основной вклад в поглощение вносят молекулы кислорода ( $O_2$ ) и воды ( $H_2O$ ), а также вода в капельном состоянии, присутствующая в облаках, тумане и дожде. Мгновенные атмосферные условия могут претерпевать значительные колебания в течение времени проведения измерений. Однако, средние значения атмосферных характеристик могут быть достаточно точно определены исходя из климатической зоны, в которой расположена точка наблюдения, а также времени года. Для моделирования распределения поглощающих веществ по высоте используется методика послойного расчета искажения сигнала (см. рис. 1), основанная на рекомендациях Международного союза электротехники [3-5]. Эта методика позволяет учитывать как статические, так и усредненные динамические характеристики атмосферы.

При распространении радиосигнала через атмосферу его энергетический спектр подвергается искажениям. В рамках данной работы эти искажения рассматриваются как аддитивная компонента к исходному энергетическому спектру (рис. 3).

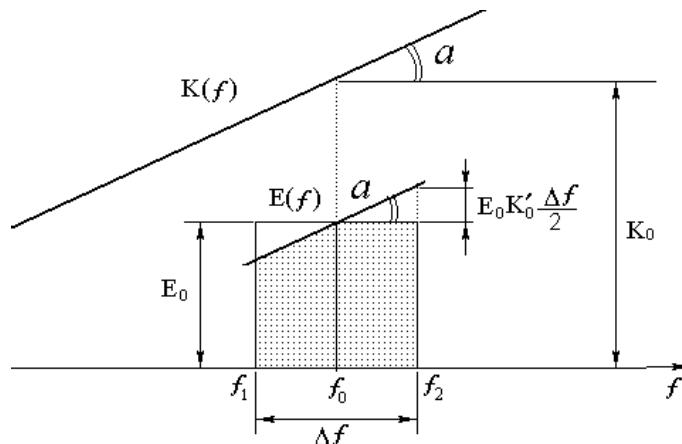


Рис. 3. Иллюстрация линейного приближения искажения спектра широкополосного радиосигнала при его прохождении через атмосферу.

На рисунке  $K(f)$  обозначает погонную частотную характеристику трассы (в дБ/км), а  $E(f)$  – энергетический спектр зондирующего сигнала. Видно, что атмосферные условия приводят к изменению формы спектра, что необходимо учитывать при обработке сигнала.

Для анализа искажений учтена первая производная коэффициента передачи по частоте на несущей частоте спектра сигнала:

$$K(f) \approx K(f_0) + \frac{\partial K}{\partial f} \Bigg|_{f=f_0} \times (f - f_0) \equiv K_0 + K'_0(f - f_0).$$

Применяя преобразование Фурье и учитывая разложение передаточной функции, получена функция автокорреляции (АКФ) сигнала на выходе согласованного фильтра приемника. АКФ представлена в виде невозмущенной части и шумовой поправки, которая отражает влияние атмосферных искажений:

$$B(\tau) = 4\pi K_0 \left[ B_0(\tau) \cos(2\pi f_0 \tau) + \frac{K'_0}{K_0} B'_0(\tau) \sin(2\pi f_0 \tau) \right], \quad (1)$$

где  $B_0(\tau)$  представляет собой огибающую АКФ зондирующего сигнала, а  $B'_0(\tau)$  – производную этой огибающей.

Уравнение (1) может быть использовано для оценки интегральных характеристик корреляционной функции принимаемого сигнала. Для астероидов, имеющих форму эллипсоида вращения, функция  $B_0(\tau)$  была рассчитана и представлена в работе [6].

Для оценки ослабления радиосигнала с учетом поглощения на молекулах кислорода и воды выполнены расчеты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Выборочные результаты расчетов ослабления радиосигнала в атмосфере (с учетом поглощения на молекулах кислорода и воды).

Зенитный угол/ несущая частота  Широтный пояс/время года	0°			45°			85°		
	3 ГГц	10 ГГц	18 ГГц	3 ГГц	10 ГГц	18 ГГц	3 ГГц	10 ГГц	18 ГГц
Низкие широты (ниже 22°) Весь год	0.9920 0.0012	0.9882 0.0001	0.9471 - 0.0080	0.9887 0.0017	0.9834 0.0001	0.9260 - 0.0114	0.9171 0.0129	0.8794 0.0004	0.5466 - 0.0902
Средние широты (22° - 45°) Зима	0.9922 0.0012	0.9907 0.0003	0.9813 - 0.0014	0.9890 0.0017	0.9869 0.0004	0.9737 - 0.0019	0.9197 0.0130	0.9047 0.0030	0.8144 - 0.0152
Высокие широ- ты (выше 45°) Лето	0.9921 0.0012	0.9899 0.0002	0.9697 - 0.0036	0.9889 0.0017	0.9857 0.0003	0.9575 - 0.0051	0.9188 0.0130	0.8964 0.0022	0.7131 - 0.0407

В каждой ячейке таблицы указаны два значения: первое ( $K_0$ ) – коэффициент поглощения вдоль всего тракта распространения сигнала (до высоты  $h=100$  км), второе – относительное изменение поглощения на ширине спектра сигнала ( $K'_0 \Delta f / K_0$ ). Ширина полосы частот сигнала принята равной  $\Delta f=0.5$  ГГц. Данные приведены для различных моделей атмосферы, зенитных углов и несущих частот.

## Выводы

На основе модели слоистой атмосферы, описанной в работах [3-5], и с помощью принятой в работе [2] методики представления поправок, вносимых атмосферой, было рассчитано затухание широкополосного радиосигнала при его прохождении через атмосферу. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- В зависимости от угла зондирования (зенитного угла), а также от концентрации водяного пара и гидрометеоров в атмосфере, относительная поправка, обусловленная помехами, может варьироваться от нескольких сотых до нескольких процентов (см. табл. 1). Это подчеркивает важность учета атмосферного влияния при радиолокационном зондировании.

• Роль водяного пара в поглощении сигнала в рассматриваемом диапазоне частот 3-18 ГГц является определяющей - пар усиливает поглощение на 0.5-1 порядок величины по сравнению со случаем полностью сухой атмосферы. Еще более существенным является вклад водяного пара в величину первой поправки; для несущей частоты 18 ГГц разница в поправках составляет почти 2 порядка величины. Эффект, вносимый водяным паром, проявляет себя более заметным образом при наблюдениях на низких широтах.

• Для компенсации влияния неравномерности частотной характеристики трассы распространения сигнала в атмосфере, при обработке принимаемого сигнала рекомендуется введение предварительных искажений во входной сигнал. Это может быть реализовано путем добавления дополнительной обработки на входе с использованием линейного фильтра, частотная характеристика которого является обратной к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) трассы в области частот сигнала. Такой подход позволит минимизировать искажения, вносимые атмосферой, и повысить точность измерений.

*Исследования выполнены за счет средств РНФ совместно с грантом Администрации Волгоградской области, номер проекта 25-22-20082.*

### Библиографический список

1. Радиотехнические системы/ Ю.М. Казаринов и др.; под ред. Ю.М. Казаринова. М: Издательский центр «Академия», 2008. – 592с.
2. Захарченко В.Д., Бондарь Ю.А., Коваленко И.Г. Точность оценки скорости быстродвижущихся космических объектов с учетом возможности использования алгоритма дробного дифференцирования доплеровского сигнала: негативное влияние частотных свойств трассы// Журнал радиоэлектроники. – 2025. Направлено в печать.
3. Международный союз электросвязи/ Рек. МСЭ-R P.676-12 РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.676-12\* Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие (Вопрос МСЭ-R 201/3) (1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016-2019) — 2019.
4. Международный союз электросвязи/ Рек. МСЭ-R P.835-4 РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.835-4 Эталонные стандарты атмосферы (Вопрос МСЭ-R 201/3) (1992-1994-1997-1999-2005) — 2005.
5. Международный союз электросвязи/ Рек. МСЭ-R P.840-7 РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.840-7\* Ослабление из-за облачности или тумана (Вопрос МСЭ-R 201/3) (1992-1994-1997-1999-2009-2012-2013-2017) — 2017.
6. Захарченко В.Д., Коваленко И.Г., Акимов П.А., Денисов З.А. О возможности оценки геометрических характеристик астероида по радиолокационному портрету. // Математ. физика и компьютер. моделирование. — 2023. — Т. 26. № 4 — С. 69-82 — DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.4.6

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ РЭС

Е.П. Васильев, Н.В. Климчук

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, KlimcNik@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе рассматривается использование системы поддержки принятия решений (СППР) для автоматизированного проектирования микроволновых радиоэлектронных средств (РЭС). Описаны алгоритмы и методы, применяемые в СППР, а также приводятся примеры проектирования конкретных устройств. Приводится сравнительный анализ эффективности проектирования с применением СППР и без неё.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, автоматизированное проектирование, микроволновые РЭС, алгоритмы, программное обеспечение.

## UTILIZING DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR AUTOMATED DESIGN OF MICROWAVE RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

E.P. Vasilyev, N.V. Klimchuk

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, KlimcNik@gmail.com

*The summary.* This paper discusses the use of decision support systems (DSS) for the automated design of microwave radio-electronic equipment (RES). The algorithms and methods used in DSS are described, and examples of designing specific devices are provided. A comparative analysis of the efficiency of design using DSS and without it is presented.

*Keywords:* decision support system, automated design, microwave RES, algorithms, software.

### Введение

Микроволновые радиоэлектронные средства (РЭС) играют ключевую роль в современных системах связи, радарах, спутниковых системах и многих других технических устройствах. Для обеспечения высокой производительности и надёжности таких систем требуется сложное и точное проектирование их компонентов. Это делает использование систем поддержки принятия решений (СППР) особенно актуальным для автоматизации процесса проектирования и повышения его эффективности. В данной статье рассматривается использование СППР для автоматизированного проектирования микроволновых РЭС, анализируются алгоритмы и методы, применяемые в СППР, а также приводятся примеры проектирования конкретных устройств [1].

### Обзор решений

Существующие СППР в области проектирования РЭС представляют собой мощные инструменты, способствующие ускорению и улучшению качества проектирования. В литературе описаны различные подходы к применению СППР для автоматизации проектирования полосовых фильтров, антенн, усилителей и других микроволновых компонентов. Например, это может быть система, использующая генетические алгоритмы для оптимизации характеристик полосовых фильтров, а ещё можно добавить применение методов машинного обучения для автоматизации проектирования антенн. Эти системы позволяют значительно сократить время и усилия, затрачиваемые на проектирование, а также минимизировать количество ошибок и улучшить параметры устройств [2].

### Методология

Для автоматизированного проектирования микроволновых РЭС используется специализированное программное обеспечение, включающее в себя СППР. Алгоритмы и методы, применяемые в СППР, включают оптимационные техники, численные методы анализа, а также инструменты для генерации и оценки различных проектных решений [3]. В качестве примера можно рассмотреть использование генетических алгоритмов для поиска оптимальной топологии полосового фильтра, методов конечных элементов для анализа электромагнитных полей в резонаторах, а также нейронных сетей для прогнозирования характеристик устройств на различных этапах проектирования. На рисунке 1 представлены библиотеки, с помощью которых можно реализовать **ядерную оценку плотности распределения** на языке программирования Python.

```
[ ] %matplotlib inline
import matplotlib.pyplot as plt
plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
import numpy as np
```

Рис. 1. Библиотеки и модули, используемые в исследовании

## Реализация

Процесс автоматизированного проектирования микроволновых РЭС с использованием СППР состоит из нескольких шагов:

- 1. Ввод исходных данных и параметров проектируемого устройства.** На этом этапе определяются основные характеристики устройства, такие как диапазон частот, допустимые потери, размеры и т.д.
- 2. Генерация проектных решений с использованием алгоритмов оптимизации и численных методов анализа.** СППР автоматически создаёт множество возможных топологий устройств и анализирует их с помощью встроенных инструментов. На рисунке 2 представлена возможная топология будущего устройства.

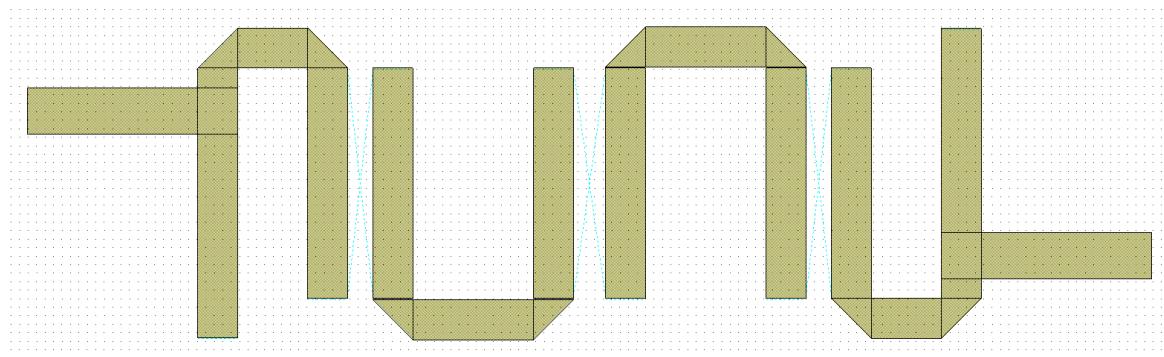


Рис. 2. Возможная топология будущего полосового фильтра

- 3. Оценка и выбор наилучшего проектного решения на основе заданных критерииев.** Полученные результаты сравниваются по нескольким показателям, таким как коэффициент передачи, уровень шумов, затраты на производство и т.д.
- 4. Проведение моделирования и верификации выбранного проектного решения.** На этом этапе проводится детальный анализ выбранного решения с использованием методов электродинамического моделирования, таких как метод конечных элементов или метод моментов [4].
- 5. Выдача проектной документации и результатов анализа.** СППР автоматически генерирует полный комплект документации, включая схемы, спецификации и отчёты об испытаниях. На рисунке 3 представлен фрагмент схемы будущего устройства.

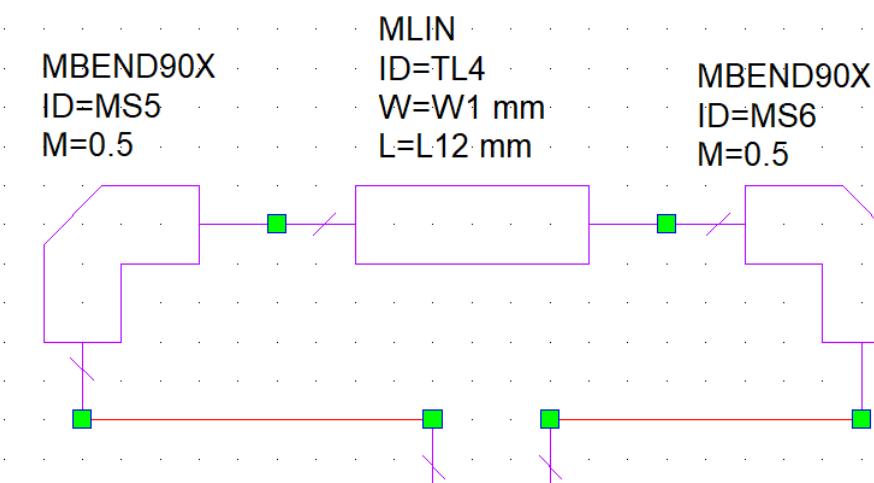


Рис. 3. Фрагмент схемы будущего полосового фильтра

## Анализ и результаты

Проведён сравнительный анализ эффективности и точности проектирования микроволновых РЭС с использованием СППР и без него. Результаты показали, что применение СППР позволяет значительно сократить время проектирования, повысить точность и качество проектных решений, а также снизить количество ошибок. Например, проектирование полосового фильтра с использованием СППР заняло на 30% меньше времени по сравнению с традиционным подходом, а точность параметров фильтра увеличилась на 15% [5]. На рисунке 4 представлена трёхмерная модель микрополоскового полосового фильтра.

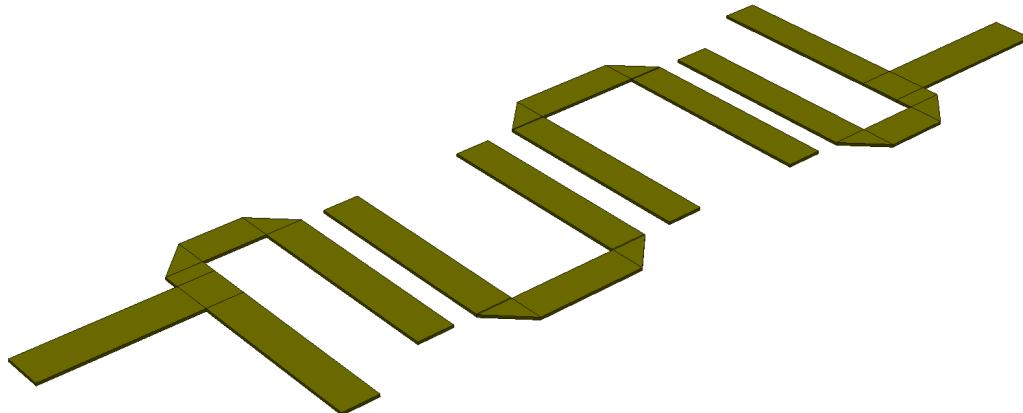


Рис. 4. Трёхмерная модель микрополоскового полосового фильтра

## Заключение

Использование системы поддержки принятия решений для автоматизированного проектирования микроволновых РЭС является перспективным направлением, позволяющим значительно повысить эффективность и качество проектирования. Разработка и применение таких систем имеет высокий потенциал для дальнейших исследований и улучшений. В будущем планируется внедрение дополнительных алгоритмов оптимизации, расширение функционала СППР и интеграция с новыми инструментами моделирования [6].

На рисунке 5 представлен наглядный график ядерной оценки плотности распределения с гауссовым ядром. Такой график позволяет увидеть намного более точное представление о распределении данных.

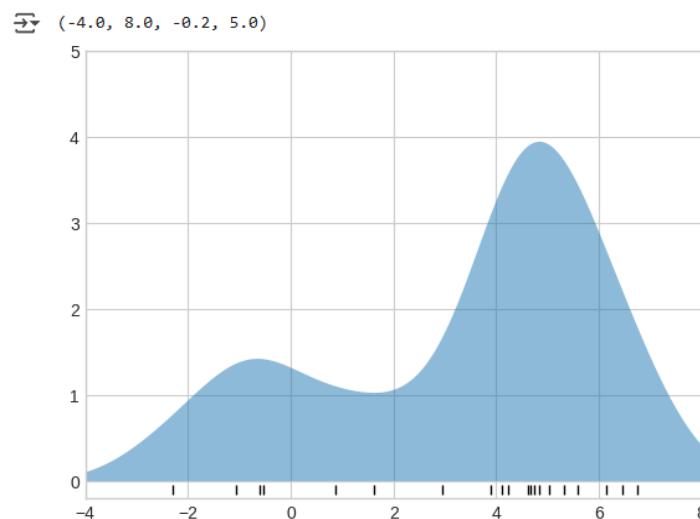


Рис. 5. Ядерная оценка плотности распределения с гауссовым ядром

**Библиографический список**

1. Васильев Е.П. Современные САПР СВЧ и их особенности [Текст] / И.А. Ермолаев, И.М. Сомов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т. 2019. – С. 174-181.
2. Васильев Е.П. Анализ электродинамических методов моделирования микроволновых устройств [Текст] / Е.П. Васильев. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т. 2019. – С. 195-199.
3. Васильев Е.П. Технология компьютерного моделирования в среде Microwave Office [Текст]: метод. указания / Е.П. Васильев. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т. 2019. – С. 40.
4. Васильев Е.П. Анализ методов моделирования микроволновых устройств на примере полосового фильтра с расширенной полосой заграждения. // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №72. 2020. – С. 62-70. (BAK).
5. Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп, Лыу Тхань Дат. Полосовой фильтр на связанных микрополосковых линиях с двумя секторными резонаторами // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №75. 2021. – С. 15-23. (BAK).
6. Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп. Анализ численными методами конструктивных вариантов миниатюрных радарных резонансных элементов // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №84. 2023. – С. 3-14. (BAK).

## СЕКЦИЯ «АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБОРО- И МАШИНОСТРОЕНИИ»

УДК 625.7

### АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАЗОГРЕВА БИТУМА

И.Н. Волков\*, В.Л. Бурковский\*\*

Воронежский государственный технический университет,  
г. Воронеж, Россия, \*ivan1900volkov@mail.ru, \*\*bvl@vorstu.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается формализация процесса принятия решений в рамках системы управления разогревом битума при производстве асфальтобетонных смесей. Подогрев битума является потенциально-опасным процессом, из-за сложноконтролируемых высоких температур. В структуре управления предлагается реализовать блок прогнозирования управляющего воздействия  $U_{\text{нач}}$ . В результате эвристического анализа осуществляется формирование правил, на базе которых производится интеллектуализация процессов принятия решений на основе аппарата нечеткой логики.

**Ключевые слова:** алгоритмизация, битум, структура, температура, интеллектуализация.

### ALGORITHMIZATION OF DECISION-MAKING IN THE SYSTEM OF FUZZY CONTROL OF THE BITUMEN HEATING PROCESS

I.N. Volkov\*, V.L. Burkovsky\*\*

Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russia, \*ivan1900volkov@mail.ru, \*\*bvl@vorstu.ru

**Abstract.** The paper considers the formalization of the decision-making process of bitumen heating in the production of asphalt concrete mixtures. Bitumen heating is a potentially dangerous process due to high temperatures. In the control structure, it is proposed to implement a block for predicting the control action  $U_{\text{нач}}$ . As a result of heuristic analysis, rules are formed, on the basis of which the intellectualization of decision-making processes is carried out on the basis of the fuzzy logic apparatus.

**Keywords:** algorithmization, bitumen, structure, temperature, intellectualization.

В статье рассматривается алгоритмизация процесса управления разогревом битума в условиях конкретных управляющих воздействий. Управление процессом разогрева битума осуществляется на основе показаний контролирующих приборов и других средств измерения с использованием традиционных законов регулирования [1].

На рисунке 1 представлен в общем виде алгоритм управления процессом разогрева битума, в структуру которого введены блок анализа и блок прогнозирования управляющего воздействия  $U_{\text{нач}}$ .

В представленной структуре на начальном этапе (блок 2) анализируется объем подачи битума. При этом контролируются регламентные показатели всего процесса разогрева:

1) температура битума:

- влажность – вода в битуме может испаряться и вызывать пузыри;
- вязкость битума более вязкий битум труднее разогреть;
- плотность битума;
- количество битума ;

2) температура окружающей среды;

3) мощность нагревателя;

4) конструкция нагревателя – эффективность теплоизоляции и распределение тепла;

5) Время контакта с нагревательными элементами;

6) Загрязнения и примеси – посторонние вещества могут влиять на характеристики;

битума

- 7) Температура окружающей среды – холодная среда замедляет разогрев;
- 8) Температура исходного битума;



Рис. 1. Обобщенная структура алгоритма управления

На основе формируемых блоком 2 данных реализуется выработка начального управляющего воздействия  $U_{\text{нач}}$ .

Затем осуществляется переход в цикличный режим работы, в результате которого происходит подстройка всех регулируемых величин процесса сушки.

Основные контролируемые параметры представлены в таблице 1

Таблица 1. Основные контролируемые параметры

№	Контролируемый параметр	Обозначение
1	Температура исходного битума	$T_{битума\_исх}$
2	Влажность	$F_{битума}$
3	Вязкость битума	$W_{битума}$
4	Плотность битума	$\rho_{битума}$
5	Скорость потока битума	$V_{битума}$
6	Объем битума	$V_{битума}$
7	Мощность нагревателя	$P_{нагрев}$
8	Время разогрева	$t_{разогрева}$
9	Конструкция и материалы нагревателя	$A_{нагрев}$
10	Температура окружающей среды	$T_{окр\_среды}$
11	Температура битума на выходе	$T_{битума\_вых}$

В блоке 7 осуществляется анализ косвенных показателей процесса разогрева. При этом анализируется состояние объекта, полученное косвенным путем и с помощью гибридной модели прогнозирования. На основании данных анализа в блоке 8 осуществляется внесение изменений в случае необходимости [2].

В блоке 9 вырабатывается вектор управляющего воздействия  $U$ , который состоит из  $\{ U_1, U_2, \dots, U_n \}$  для каждого из регулируемых параметров.

Все регулируемые параметры выделим в таблице 2

Таблица 2. Регулируемые параметры

№	Регулируемый параметр	Размерность	Примечание
1	Подача битума		
1.1	Объем подачи битума	$m^3$	Задается оператором
2	Параметры битума		
2.1	Вязкость битума	$Pa \cdot s$	должно удовлетворять требованиям
2.2	Плотность битума	$kg/m^3$	должно удовлетворять требованиям
2.3	Влажность	%	должно удовлетворять требованиям
2.4	Скорость потока битума	$km/h$	
3	Конструкция и материалы нагревателя		
3.1	Мощность нагревателя	$Wt$	Задается оператором
3.2	Время разогрева	ч	
4	Температура разогрева		
4.1	Температура исходного битума	$^{\circ}C$	
4.2	Температура окружающей среды	$^{\circ}C$	
4.3	Температура битума на выходе	$^{\circ}C$	должно удовлетворять требованиям

Управляющий вектор равен  $U^{(n)} = U^{(n-1)} + \Delta U^{(n)}$ , где  $U^{(n)}$  – управление на шаге  $n$ ,  $\Delta U^{(n)}$  – изменение управления.  $U(n)$  представляет собой зависимость от предыдущего управления и набора векторов контролируемых параметров на предыдущих шагах:

$$U(n) = F(U^{(n-1)}, X')$$

где  $X'$  – массив векторов контролируемых параметров  $X$ , то есть  $X' = \{X^{(k)}, X^{(k+1)}, \dots, X^{(n)}\}$ . Информация может собираться за ограниченное число измерений, поэтому  $k$  не обязательно равно 1

Регулируемыми параметрами, с точки зрения управления, являются все изменяемые параметры ведения технологического процесса подогрева битума, которые обеспечивают функционирование объекта в заданных границах регулирования.

Для наглядного представления внесем в схему управления формальную взаимосвязь косвенных параметров процесса разогрева битума от регулирующих воздействий.

Введем правило для температуры битума на выходе, сформированное на основе эвристического анализа:

- увеличение количества подаваемого исходного битума приводит к снижению температуры барды на выходе;
- увеличение мощности нагревателя приводит к увеличению температуры готового продукта и наоборот;
- температура окружающей среды также влияет на процесс: холодная среда замедляет процесс разогрева;

Предложенная алгоритмизация процесса управления производственными процессами с повышенным уровнем риска служит основой для создания специализированного математического инструмента, предназначенного для управления в условиях опасных производств. Для построения этого алгоритма можно использовать матрицу соответствия ситуациям управляющий решений.

### **Библиографический список**

- 1 Макаш Игнат Станиславович. Интеллектуализация процесса управления потенциально опасным производством на основе гибридной модели прогноза динамики состояния (на примере сушки барды): диссертация ... кандидата Технических наук: 05.13.01 / Макаш Игнат Станиславович; [Место защиты: Воронежский государственный технический университет].- Воронеж, 2016.- 155 с.
2. Моделирование процессов управления качеством производства оптоволоконного модуля на основе аппарата нечеткой логики/Тураев А.Х./диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Воронежский государственный технический университет". Воронеж, 2004.

УДК 681.514

## **ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

**д.н. Карпухин, В.Л. Бурковский**

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, Воронеж, karpuxin.1996@mail.ru*

**Аннотация.** Производство высоконадежных автономных объектов управления представляют собой сложный и дорогостоящий процесс, который требует значительных ресурсов и времени. Архитектура таких систем является сложной, что делает их подверженными различным сбоям и ошибкам, способным негативно сказаться на функционировании всей системы. В условиях, когда ухудшение производительности крайне нежелательно, важно как можно быстрее выявлять любые потенциальные аномалии и неисправности. Для этих целей необходима система мониторинга производства. Это связано с тем, что даже незначительные сбои могут привести к снижению продуктивности и серьезным проблемам с безопасностью. Для решения данной проблематики существуют различные подходы, однако разнообразие доступных методов может затруднить выбор наиболее подходящего для конкретного контекста. В данной статье рассматривается архитектура интеллектуальной системы мониторинга производственных процессов, которая базируется на объединении интеллектуальных методов с современными стратегиями обнаружения и диагностики неисправностей и самовосстановления-отказоустойчивости.

**Ключевые слова:** высоконадежный автономный объект управления, интеллектуальные методы, обнаружение и диагностика неисправностей, самовосстановление-отказоустойчивость.

## A HYBRID APPROACH FOR BUILDING AN INTELLIGENT MONITORING SYSTEM FOR PRODUCTION PROCESSES

D.N. Karpukhin, V.L. Burkovsky

Voronezh State Technical University, Voronezh,  
Russian Federation, karpuxin.1996@mail.ru

*The summary.* The production of highly reliable autonomous control facilities is a complex and expensive process that requires significant resources and time. The architecture of such systems is complex, which makes them susceptible to various failures and errors that can negatively affect the functioning of the entire system. In conditions where performance degradation is highly undesirable, it is important to identify any potential anomalies and malfunctions as quickly as possible. For these purposes, a production monitoring system is needed. This is because even minor disruptions can lead to reduced productivity and serious security issues. There are various approaches to address this issue, but the variety of available methods may make it difficult to choose the most appropriate one for a particular context. This article discusses the architecture of an intelligent process monitoring system, which is based on combining intelligent methods with modern strategies for fault detection and diagnosis and self-repair-fault tolerance.

*Keywords:* highly reliable autonomous control facility, intelligent methods, fault detection and diagnosis, self-healing-fault tolerance.

Высоконадежный автономный объект управления (ВАОУ) представляет собой сложную и многофункциональную систему, в которую интегрированы передовые технологии, такие как современные датчики, высокоточная электроника и программируемые логические контроллеры (ПЛК). [1] ВАОУ функционирует как взаимосвязанная система, где аппаратные и программные компоненты работают в унисон для достижения оптимальных результатов. Однако такая сложная архитектура создает определенные трудности в процессе производства, особенно в аспектах контроля и мониторинга. Одной из ключевых проблем, с которыми сталкиваются производственные системы, является уязвимость к различным типам сбоев. Эти сбои могут существенно повлиять на устойчивость всей системы, приводя к увеличению времени простоя оборудования, повышенному потреблению энергии и увеличению затрат на техническое обслуживание. В результате, это может негативно сказаться на сроке службы как аппаратного, так и программного обеспечения, а также привести к значительным техническим и финансовым издержкам.

Для решения этих проблем существуют различные подходы. Одним из них является стратегия обнаружения и диагностики неисправностей (СОНД). Методы СОНД состоят из этапов, которые соответствуют важнейшим компонентам эффективных систем мониторинга. Как правило, эти методы основаны на трёх этапах. Первым этапом является обнаружение неисправностей, то есть процесс определения неисправностей и времени их возникновения в системе. За ним следует этап устранения неисправностей, цель которого определить источник неисправности, и извлечь некоторую информацию, например, о её типе и местоположении. Третьим этапом является идентификация неисправности. На этом этапе определяется масштаб и предполагаемое время возникновения неисправности. [2,3]

Другим важным подходом является стратегия самовосстановления и отказоустойчивости (ССО). Она основана на методах самовосстановления, которые направлены на повышение производительности и эффективности системы. Самовосстанавливающиеся системы становятся эффективным решением проблемы растущей сложности требований к управлению на производстве. ССО классифицируют и анализируют сенсорные данные, чтобы автоматично обнаруживать и устранять неисправности. В результате требуется минимальное взаимодействие между системой и оператором, что минимизирует эксплуатационные расходы и улучшает существующие методы устранения неисправностей. Технологии самовосстановления могут без вмешательства человека заблаговременно отслеживать и выявлять отклонения от стандартных параметров, подтверждать их с высокой степенью достоверности и восстанавливать нормальную работу производственной системы. [4,5]

Интеллектуальные методы, такие как алгоритмы машинного обучения и нейронные сети, также играют значительную роль в повышении надежности производственных процессов. [6] Эти технологии позволяют анализировать большие объемы данных, выявлять закономерности и оптимизировать процессы, что в свою очередь способствует повышению общей эффективности. Внедрение интеллектуальных методов в существующие производственные процессы обеспечит непрерывный анализ состояния оборудования и оперативное реагирование на любые изменения. Это также позволит минимизировать время простоя оборудования и снизить затраты на обслуживание, тем самым повысит общую безопасность производственной среды.

### **Структура интеллектуальной системы мониторинга производства**

Разработка интеллектуальной системы мониторинга производства (ИСМП) является серьезным вызовом, связанным с определенными трудностями, возникающими в процессе производства, особенно в аспектах контроля за сбоями. Проблема не ограничивается простым обнаружением факта сбоя, она также включает в себя анализ его природы, времени возникновения и комбинаций различных типов. Сбои могут проявляться как последовательные, параллельные или представлять собой комбинацию всех этих вариантов. Такое многообразие возможных сбоев значительно усложняет задачу построения ИСМП, способную учитывать все уровни производственного процесса.

Для решения этой задачи предлагается архитектура интеллектуальной системы мониторинга производства, основанная на интеллектуальных методах, стратегии обнаружения и диагностики неисправностей, и стратегии самовосстановления и отказоустойчивости. Эта архитектура представляет собой значительный шаг вперед по сравнению с традиционными подходами, поскольку она не только обнаруживает сбои, но и анализирует их причины, прогнозирует потенциальные проблемы и автоматически предпринимает корректирующие действия.

Предлагаемая архитектура обеспечивает эффективное управление потоком данных между различными уровнями производственной системы. Она определяет взаимодействие взаимосвязанных подсистем, обеспечивая расширенный мониторинг, основанный на диагностике множества неисправностей и механизмах самовосстановления. На рисунке 1 представлена структура интеллектуальной системы мониторинга производства, которая позволяет лучше понять взаимосвязи между ее компонентами.

Процесс начинается в блоке контролируемого процесса со сбора необработанных данных из различных источников. Следом за ним идет блок интеллектуальной диагностики неисправностей, который состоит из трех этапов: обнаружение, изоляция и идентификация неисправностей. На первом этапе происходит обнаружение возможных неисправности в различных слоях высоконадежного автономного объекта управления. Эти неисправности могут быть связаны с датчиками, исполнительными механизмами или даже процессами в различных взаимосвязанных системах, составляющих контролируемую производственную систему.

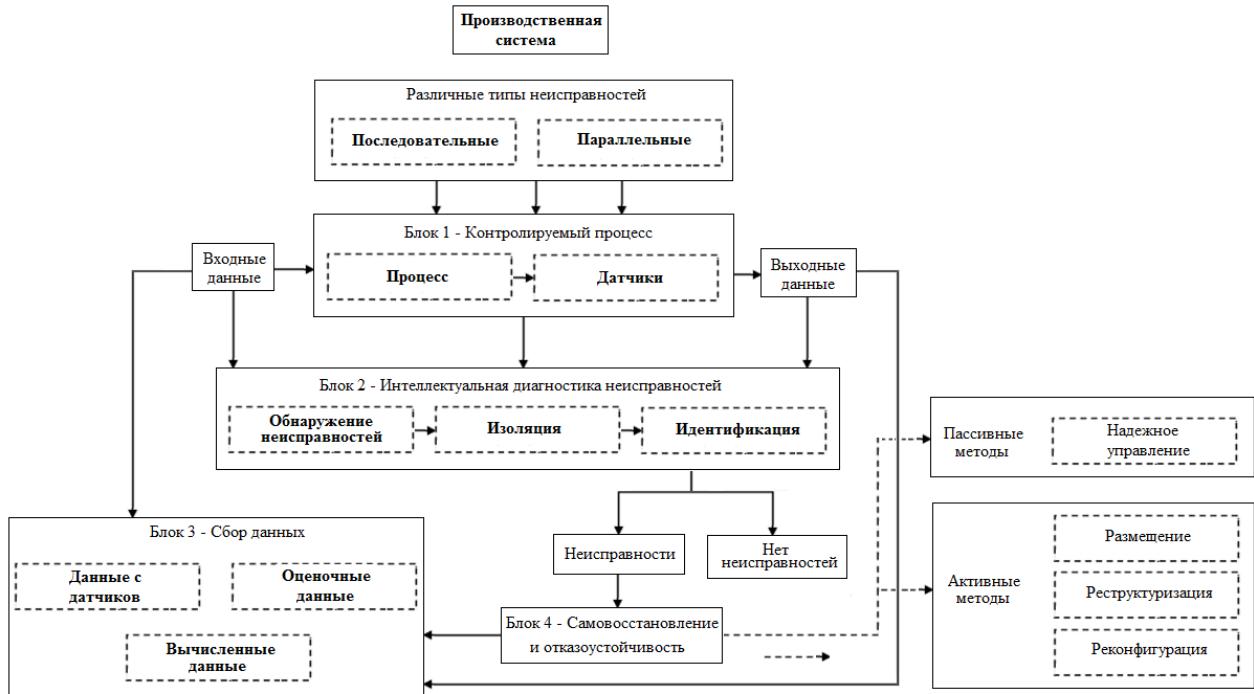


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы мониторинга производства

На втором этапе интеллектуальный блок диагностики получает различные остаточные данные, рассчитанные в соответствии с результатом обнаружения неисправности. Затем формируется матрица неисправностей, связанная с количеством датчиков и исполнительных механизмов, а также с типом рассматриваемой неисправности. Эта матрица предоставляет относительную информацию о типе неисправности или о неисправном процессе. На третьем этапе выполняется идентификация неисправностей с помощью методов искусственного интеллекта для обработки данных. Процедуры диагностики обычно основаны на вариантах сбора данных для получения информации в режиме реального времени. Эта информация находится в блоке сбора данных и может быть связана с различными характеристиками неисправности, такими как её тип, характер, время возникновения, причина и т. д. Как показано в блоке сбора данных, первый вариант основан на данных, непосредственно измеренных датчиками. Второй вариант основан на диагностируемых данных, рассчитанных на основе физической модели, если она существует. Третий вариант основан на данных, сохранённых в режиме реального времени. Самовосстанавливающийся и отказоустойчивый подход обеспечивает стабильность и оптимальную работу контролируемой системы даже при наличии неисправностей. Это реализовано с помощью активных и пассивных методов. Предложенная архитектура интеллектуальной системы мониторинга оказывает положительное влияние на надежность и отказоустойчивость производства, сокращая при этом время отклика и сводя к минимуму потенциальные неисправности в производственном процессе, что ведет к снижению затрат на техническое обслуживание и время простоя.

## Выводы

Внедрение предлагаемой архитектуры ИСМП позволит повысить эффективность и надежность производственных процессов, снизить риски возникновения сбоев и минимизировать их негативные последствия. Благодаря концепции СОНД, ИСМП способна адаптироваться к изменяющимся условиям производства без необходимости внешнего вмешательства, а принципы ССО обеспечивают устойчивость производственного процесса. Дальнейшие

исследования в этой области будут направлены на разработку конкретных алгоритмов и методов реализации принципов СОНД и ССО для различных отраслей промышленности.

### **Библиографический список**

1. Карпухин Д.Н. Структура системы управления внутренним электроснабжением автономного объекта энергообеспечения / Д.Н. Карпухин, В.Л. Бурковский // Сборник докладов XVIII международной конференции по электромеханике и робототехнике. – 2023. – С. 221-225.
2. Хофер Э. Численные методы оптимизации / Э. Хофер, Р. Лундерштедт // М.: Машиностроение – 1981. – 192 с.
3. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах // М.: ДМК Пресс – 2015. – 400 с.
4. Шалев-Шварц Ш. Идеи машинного обучения: от теории к алгоритмам / Ш. Шалев-Шварц, Ш. Бен-Давид // М.: ДМК Пресс – 2019. – 436 с.
5. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд. / С. Хайкин – М.: Вильямс – 2006 – 1104 с.
6. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей/ А.В. Созыкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2017. – т. 6. – № 3. – С. 29-59.

УДК 678.028: 53.08; ГРНТИ 61.61.81

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**О.С. Дмитриев<sup>1,2</sup>, А.А. Барсуков<sup>1</sup>, С.О. Дмитриев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет,  
Россия, Тамбов, phys@tstu.ru,

<sup>2</sup>Российская академия естественных наук

**Аннотация.** В работе рассматриваются необходимость минимизации погрешности экспериментального исследования характеристик полимерных композиционных материалов для обеспечения надежного математического моделирования и оптимизации процесса отверждения. Показано, что основным параметром исследуемого образца, оказывающим существенное влияние на определяемые характеристики процесса отверждения, является его толщина. Обсуждаются противоречия, связанные с толщиной исследуемых образцов. Проведено имитационное моделирование и исследовано влияния толщины на точность измерений. На основании полученных данных установлено, что толщина образца для исследования характеристик полимерных композитов должна превышать 5 мм.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, теплофизические и кинетические характеристики, имитационное моделирование, погрешности, размер образца.

### **DETERMINATION OF THE OPTIMAL SAMPLE SIZE FOR STUDYING THE CURING PROCESS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

**O.S. Dmitriev<sup>1,2</sup>, A.A. Barsukov<sup>1</sup>, S.O. Dmitriev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Tambov State Technical University, Russia, Tambov, phys@tstu.ru,

<sup>2</sup>Russian Academy of Natural Sciences

**The summary.** The paper considers the need to minimize the error in the experimental study of the characteristics of polymer composite materials to ensure reliable mathematical modeling and optimization of the curing process. It is shown that the main parameter of the sample under study, which has a significant effect on the determined characteristics of the curing process, is its thickness. Contradictions associated with the thickness of the samples under study are discussed. Simulation modeling was carried out and the effect of thickness on the accuracy of measurements was studied. Based on the data obtained, it was found that the thickness of the sample for studying the characteristics of polymer composites should exceed 5 mm.

**Key words:** polymer composite materials, thermophysical and kinetic characteristics, simulation modeling, errors, sample size.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе термореактивных связующих (матриц) армированные углеродными, стеклянными, органическими и другими наполнителями (волокнами, тканями или матами) нашли широкое применение в современной технике. В настоящее время ПКМ применяются в авиации и космонавтике, электро- и радиотехнике, ветроэнергетике и электронике, судо- и машиностроении, автомобильной и сельскохозяйственной технике, химической промышленности и во многих других отраслях [1].

Основным процессом, при котором формируется структура композита, является тепловая обработка исходного материала ПКМ (препрега). В течение термообработки активируется химическая реакция сшивки полимерного термореактивного связующего и происходит отверждение ПКМ. Процесс отверждения происходит с выделением тепла, поэтому термообработку изделий из ПКМ необходимо проводить по строго определенному оптимальному температурно-временному режиму отверждения, поиск которого в последнее время осуществляют на основе математического моделирования и оптимизации [2, 3]. Математическое моделирование предусматривает наличие или определение при их отсутствии параметров модели процесса отверждения, к которым относятся теплофизические и кинетические характеристики, включая: теплоемкость  $C$ , теплопроводность  $\lambda$ , мощность тепловыделений  $W$  и тепловой эффект реакции отверждения  $Q$ , служащие основой для определения энергии активации  $E$  и кинетической функции  $\phi(\beta)$  процесса отверждения ПКМ [4, 5]. Применяемые для этой цели стандартные приборы и установки, как правило, имеют ограниченные функциональные возможности, не позволяющие определять теплофизические характеристики (ТФХ)  $C(T,\beta,\gamma)$  и  $\lambda(T,\beta,\gamma)$  в процессе отверждения в зависимости от температуры  $T$ , степени отверждения  $\beta$  и коэффициента наполнения  $\gamma$  или кинетические характеристики  $E(\beta)$  и  $\phi(\beta)$  в условиях близких к производственному процесса получения изделий из ПКМ. Поэтому исследование теплофизических и кинетических характеристик ПКМ при отверждении и расчет оптимального температурно-временного режима отверждения проводили с помощью специально разработанной информационно-измерительной системы (ИИС) процесса отверждения, содержащей в своем составе специальные аппаратно-технические средства, а также математическое, алгоритмическое, метрологическое и программное обеспечение, ориентированное на решение прямых, обратных и оптимизационных задач [3, 6].

Основной частью ИИС является измерительное устройство, реализующее необходимые условия нагрева и отверждения исследуемых образцов. Конструкция измерительного устройства во многом определяется геометрией исследуемых образцов. Поэтому особое внимание уделяется выбору и расчету оптимальной геометрии образцов исследуемых материалов.

Под оптимальной геометрией образца следует понимать такую его форму и размеры, которые обеспечивают выполнение допущений принятых при выводе расчетных формул для определения теплофизических характеристик  $C(T,\beta,\gamma)$ ,  $\lambda(T,\beta,\gamma)$ , мощности тепловыделений  $W(t)$ , полного теплового эффекта  $Q_p$  и кинетических характеристик  $E(\beta)$ ,  $\phi(\beta)$ .

Как следует из анализа источников инструментальных и методических погрешностей, основным допущением является то, что исследованию подвергается образец в форме неограниченной пластины и температурное поле в точности соответствует принятой математической модели. На практике определяются теплофизические характеристики и мощность тепловыделений образцов конечных размеров на основе температурных данных, измеренных с некоторой погрешностью. Для того чтобы исследуемый образец в тепловом отношении соответствовал модели неограниченной пластины, необходимо, чтобы отношение его ширины или эквивалентного диаметра  $D$  к толщине  $L$  было не менее 10:1. Уменьшение этого отношения может привести к искажению температурного поля по оси исследуемого образца, если на его боковой поверхности не создать необходимых условий.

Основным параметром исследуемого образца, оказывающим существенное влияние на определяемые характеристики процесса отверждения, является его толщина. При одной и той же точности измерения исходных данных с увеличением толщины исследуемого образца происходят различные явления:

- уменьшается погрешность определения координат расположения рабочих спаев термопар (ввиду конечности их размеров);
- уменьшается относительная погрешность определения разности температур в направлении температурного градиента за счет его абсолютного увеличения в условиях одних и тех же граничных тепловых режимов;
- уменьшается влияние случайных погрешностей измерения температуры на результат определения ТФХ и мощности тепловыделений;
- в большей степени выдерживается предположение о малости перераспределения температуры во времени внутри отдельных ячеек композита и, следовательно, принятая в математической модели квазизотропность (однородность в макрообъемах) исследуемого материала.

В то же время, с увеличением толщины исследуемого образца:

- увеличивается расход материала, имеющего в настоящее время высокую стоимость;
- увеличиваются энергозатраты на его исследование;
- увеличиваются расходы на изготовление измерительного устройства.

По совокупности перечисленных противоречивых факторов можно сделать вывод, что оптимальными являются некоторые минимальные размеры образцов, обеспечивающие при их исследовании заданную, известную точность определения ТФХ, мощности тепловыделений и кинетических характеристик. Наиболее значимой из перечисленных факторов является влияние случайной погрешности на точность расчета ТФХ и мощности тепловыделений. Поэтому целесообразно ограничиться рассмотрением только этой зависимости.

Для определения оптимальных размеров образцов необходимо провести имитационное моделирование путем постановки численных экспериментов, моделирующих указанные выше ситуации.

Первым этапом имитационного моделирования является решение прямой задачи теплопроводности с использованием в качестве параметров модели заданные значения  $C$ ,  $\lambda$ ,  $W$  и  $Q$ , затем наложение на полученное решение шумов, имитирующих случайные погрешности измерения. Завершающим этапом является решение обратных задач по определению ТФХ и мощности тепловыделений, и затем сравнение полученных значений  $C$ ,  $\lambda$ ,  $W$  и  $Q$  с заданными значениями. В качестве заданных значений для определения оптимальной толщины исследуемого образца выбрали некоторые средние, характерные для ПКМ, постоянные значения теплоемкости  $C = 2 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К), теплопроводности  $\lambda = 0,3$  Вт/(м·К) и мощность тепловыделений, аппроксимированной аналитической функцией

$$W^*(t) = \frac{8 \cdot 10^4}{(t - 2300)^2 / 49 \cdot 10^4 + 1} \text{ Вт/м}^3.$$

Решение прямой задачи теплопроводности можно проводить различными методами, например в Mathcad Express, но наличие в правой части мощности тепловыделений  $W$  ограничивает её использование и поэтому для имитационного моделирования применили алгоритм и программу, реализующую метод конечных разностей, входящую в состав ИИС и используемую для расчета оптимальных режимов отверждения.

В предположении, что тепловой процесс описывается уравнением теплопроводности с внутренними источниками тепла, численно решалась прямая задача с граничными условиями второго рода для образцов толщиной  $L$  от 2,5 до 15 мм. Величину теплового потока  $q$ , ис-

ходя из возможных темпов нагрева исследуемых образцов, выбирали трех значений 200, 1000 и 3000 Вт/м<sup>3</sup>.

При решении краевой задачи вводилась равномерная по  $x$  и  $t$  сетка, размерность которой  $M$  и  $N$  соответствовала требованиям получения наивысшей точности решения краевой задачи, например  $M = 45$  и  $N = 1000$ . Из найденного температурного поля  $T(x_i, t_j)$ ,  $I = 1, 2, \dots, M$ ,  $J = 1, 2, \dots, N$  выбирали  $m = 3$  значений по пространственной координате  $x$  и  $n = 100$  значений температуры по времени  $t$ . В результате получали имитацию экспериментальных данных  $T(x_i, t_j)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , вычисленную при заданных  $C$ ,  $\lambda$ ,  $W$  и  $Q$ . На полученное в результате расчета температурное поле  $T(x_i, t_j)$  накладывался равномерно распределенный шум

$$T_{i,j}^* = T(x_i, t_j) + \Delta_T \xi_{i,j},$$

где  $\Delta_T$  – погрешность измерения температуры в ИИС,  $\xi_{i,j}$  – случайное число, полученное с помощью генератора случайных чисел, равномерно распределенное на сегменте  $[-1, 1]$  с математическим ожиданием  $M = 0$  и дисперсией  $\sigma = 1$ .

Затем зашумленное температурное поле  $T_{i,j}^*$  использовали в качестве модельных исходных данных для расчета  $C_j$ ,  $\lambda_j$ ,  $W_j$ ,  $Q_j$  и оценивали среднеквадратическую погрешность

$$\delta C = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (C_j - C)^2}{n(n-1)}}, \quad \delta \lambda = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\lambda_j - \lambda)^2}{n(n-1)}}, \quad \delta W = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (W_j - W_j^*)^2}{n(n-1)}}, \quad \delta Q = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Q_j - Q_j^*)^2}{n(n-1)}}.$$

Зависимости априорной среднеквадратичной погрешности  $\delta$  объемной теплоемкости  $C$ , теплопроводности  $\lambda$ , мощности тепловыделений  $W$  и теплового эффекта  $Q$  от толщины образца  $L$  и граничного теплового потока  $q$  представлены на рисунках 1 – 4.

Из графиков видно, что среднеквадратическая погрешность  $\delta$  определения объемной теплоемкости  $C$ , мощности тепловыделений  $W$  и теплового эффекта  $Q$  по формулам, полученным из решения обратной задачи теплопроводности [4] с весовой функцией  $p(x) = 1$ , практически не зависит от толщины исследуемого образца  $L$ . При наложенном уровне шума и погрешности измерения температурного поля  $\Delta_T = 0,2$  К погрешность  $\delta C$  определения объемной теплоемкости лежит в пределах 2...3% (см. рис. 1). Погрешности определения мощности тепловыделений  $\delta W$  и теплового эффекта  $\delta Q$  лежат в пределах 1,5% и 0,5% вследствие интегрального характера  $Q$  (см. рис. 3).

Среднеквадратическая погрешность теплопроводности  $\delta \lambda$  и мощности тепловыделений  $\delta W$ , вычисленные по формулам, полученным из решения обратной задачи теплопроводности [4] с весовой функцией  $p(x) = x(L-x)$ , существенно увеличиваются с уменьшением толщины образца  $L$ . При наложенном уровне шума и погрешности измерения температурного поля  $\Delta_T = 0,2$  К погрешность определения теплопроводности при толщине образца 5 мм лежит в районе 4...5% и уменьшается до 3% при увеличении толщины образца (см. рис. 2). Погрешности определения мощности тепловыделений  $\delta W$  и теплового эффекта  $\delta Q$  находятся в пределах от 5 до 3% при толщине образца более 5 мм и уменьшается до 2% при толщине образца 10 мм (см. рис.3).

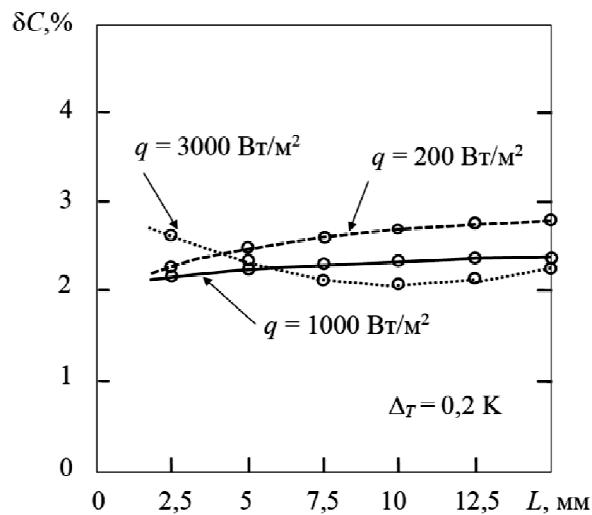


Рис. 1. Среднеквадратическая погрешность вычисления объемной теплоемкости  $C$  в зависимости от толщины образца  $L$  и теплового потока  $q$

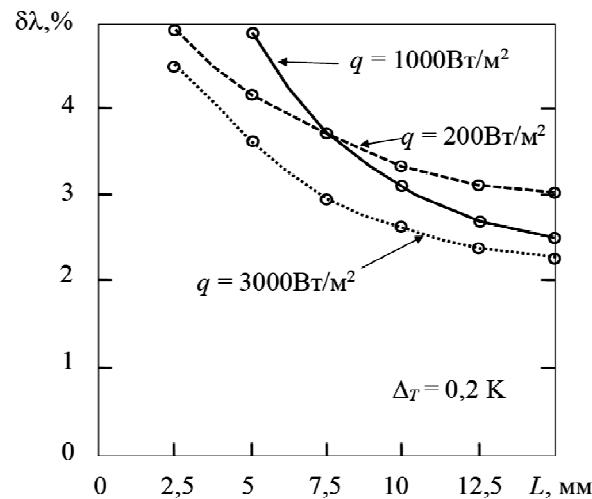


Рис. 2. Среднеквадратическая погрешность вычисления теплопроводности  $\lambda$  в зависимости от толщины образца  $L$  и теплового потока  $q$

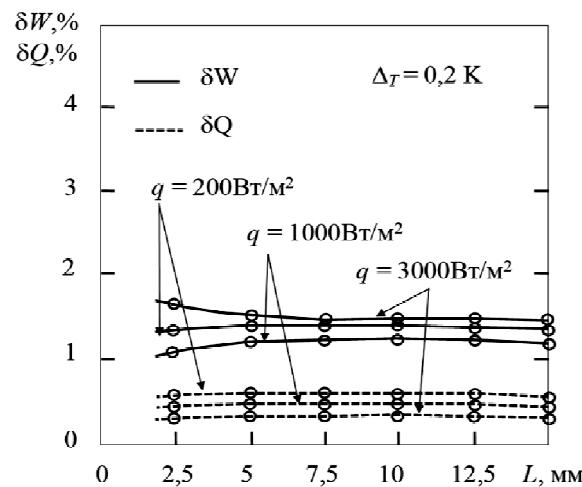


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичной погрешности определения  $W$  и  $Q$  по формулам с  $p(x) = 1$  в зависимости от толщины  $L$  образца и граничного теплового потока  $q$

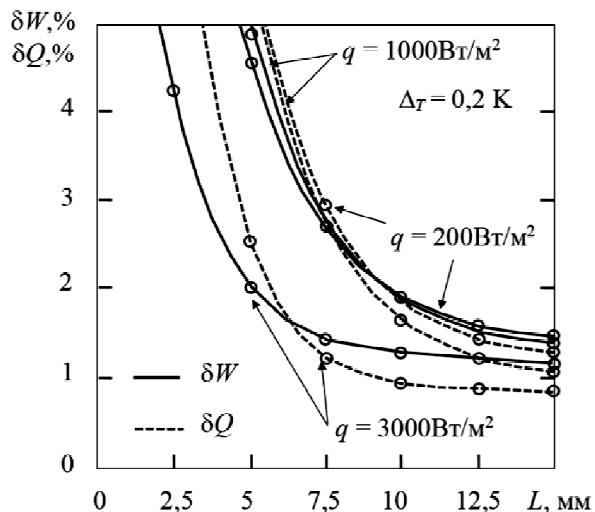


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной погрешности определения  $W$  и  $Q$  по формулам с  $p(x) = x(L - x)$  в зависимости от толщины  $L$  образца и граничного теплового потока  $q$

Отсюда следует, что при решении обратной задачи теплопроводности с весовой функцией  $p(x) = 1$  можно исследовать образцы толщиной от 2,5 мм. Но учитывая, что теплопроводность  $\lambda$  исследуется в одном и том же эксперименте вместе с объемной теплоемкостью  $C$ , минимальная толщина образца, для которого  $\lambda$  и  $C$ , а также  $W$  можно измерить на уровне погрешности 5 %, составляет более 5 мм. Таким образом, толщина образца  $L$  при экспериментальном исследовании характеристик ПКМ с помощью измерительного устройства ИИС должна находиться в пределах 5...15 мм, т.е. оптимально 8...10 мм.

Из расчетов оптимальной толщины образца также следует, что для исследуемого образца должно выполняться условие  $D/L > 10$ , т.е. отношения ширины или эквивалентного диаметра  $D$  к толщине  $L$ . С учетом оптимальной толщины 10 мм получаем эквивалентный диаметр  $D$  образца 100 мм или образец в форме квадрата со стороной 100×100 мм. Квадратная форма образца предпочтительна в плане удобства нарезки и укладки ткани перекрестного плетения или волокна с перекрестной укладкой. Увеличение толщины образца до 15 мм и выше может приводить к искажению температурного поля в центральной области, где укладываются термопары и увеличению погрешностей определения характеристик ПКМ. Поэтому возникает необходимость исключить или уменьшить оттоки тепла с боковой поверхности с помощью боковых охранных нагревателей.

Полученные результаты расчета оптимальных размеров образца положены в основу конструкции измерительного устройства и функциональной схемы ИИС процесса отверждения ПКМ, что позволяет повысить точность определения теплофизических и кинетических характеристик и расчета оптимальных технологических температурно-временных режимов отверждения изделий из ПКМ и в конечном итоге способствует инновационному развитию производства полимерных материалов.

### Библиографический список

1. Каблов, Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90, № 4. – С. 331 - 334.
2. Дмитриев, О.С. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов / О.С. Дмитриев, В.Н. Кириллов, А.О. Дмитриев, А.В. Зуев // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5. № 10. – С. 467 - 475.
3. Dmitriev, O.S. Thermo-chemical analysis of the cure process of thick polymer composite structures for industrial applications / O.S. Dmitriev, A.A. Zhyvenkova, A.O. Dmitriev // Advanced Materials and Technologies. – 2016. – № 2. – P. 53 - 60.

4. Мищенко, С.В. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формования в технологическом пакете / С.В. Мищенко, О.С. Дмитриев, А.В. Шаповалов, В.Н. Кириллов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2001. – Т. 7, №1. – С. 7 - 19.
5. Дмитриев, О.С. Моделирование теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / О.С. Дмитриев, А.А. Барсуков, Д.Я. Баринов // Теплофизика и аэромеханика. – 2024. – Т. 31. № 2. – С. 355-370.
6. Живенкова, А.А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы исследования теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А.А. Живенкова, О.С. Дмитриев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – Т. 54. № 4. – С. 212-217.

УДК 621.81; ГРНТИ 50.47.02

## **ОТ РУЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ К ЦИФРОВЫМ МОДЕЛЯМ: РЕАЛИЗАЦИЯ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПАС-3Д**

**О.В. Миловзоров, А.М. Мосина**

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

*Рязань, nastya.mosina.2002@gmail.com*

**Аннотация.** Статья посвящена переходу от традиционных методов ручного измерения к современным цифровым технологиям в рамках обратного инжиниринга. Рассмотрены основные этапы процесса восстановления цифровых моделей физических объектов с использованием программы КОПАС-3Д. В статье также приведен практический пример создания конструкторской документации на шестеренку, демонстрирующий возможности КОМПАС-3Д для автоматизации процессов проектирования и оформления чертежей. Материал будет полезен инженерам, конструкторам и специалистам в области машиностроения, заинтересованным во внедрении цифровых технологий в производственные процессы.

**Ключевые слова:** обратный инжиниринг, КОМПАС-3Д, конструкторская документация, CAD-системы, автоматизация проектирования, машиностроение.

## **FROM MANUAL MEASUREMENTS TO DIGITAL MODELS: IMPLEMENTING REVERSE ENGINEERING USING COMPASS-3D**

**O.V. Milovzorov, A.M. Mosina**

*Ryazan State Radio Engineering University*

*Ryazan, nastya.mosina.2002@gmail.com*

**Annotation.** The article is devoted to the transition from traditional manual measurement methods to modern digital technologies in the framework of reverse engineering. The main stages of the process of restoring digital models of physical objects using the COPAS-3D program are considered. The article also provides a practical example of creating design documentation for a gear, demonstrating the capabilities of COMPASS-3D for automating design sag and drawing drawings. The material will be useful for engineers, designers and specialists in the field of mechanical engineering who are interested in introducing digital technologies into production processes.

**Keywords:** reverse engineering, COMPASS-3D, design documentation, CAD systems, design automation, mechanical engineering.

### **Введение**

Современное производство и проектирование невозможно представить без использования цифровых технологий. При проектировании новых изделий очень часто используются уже имеющиеся ранее разработанные и изготовленные образцы и отдельные детали, по которым зачастую отсутствует конструкторская документация. При этом возникает задача формирования чертежа, 3D-модели, для которой необходимо выполнить массу контрольных измерений, традиционно реализуемых вручную. Одним из ключевых инструментов, позволяющих перейти от традиционных методов ручного измерения и проектирования к созданию

точных цифровых моделей, является обратный инжиниринг. Этот процесс предполагает восстановление цифровой модели объекта на основе его физического образца с использованием автоматических измерительных средств и программного обеспечения CAD-систем. В данной статье рассмотрим, как реализовать обратный инжиниринг с использованием программы КОМПАС-3D, а также приведем пример создания конструкторской документации (КД) на шестеренку.

### **Обратный инжиниринг: суть и преимущества**

Обратный инжиниринг — это автоматизированный процесс анализа существующего объекта с целью создания его цифровой модели. Этот подход особенно востребован в случаях, когда исходная документация утеряна или требуется модернизация устаревших деталей.

Основные этапы обратного инжиниринга включают:

- сканирование или измерение физического объекта;
- создание цифровой модели на основе полученных данных;
- верификация и доработка модели.

Преимущества обратного инжиниринга:

- существенное ускорение процесса проектирования;
- возможность модернизации и оптимизации существующих деталей на основе полученных 3D-моделей.

### **Система КОМПАС 3-D и ее возможности для использования в обратном инжиниринге**

КОМПАС-3D — это мощная CAD-система, которая предоставляет широкие возможности для создания цифровых моделей. Программа поддерживает импорт данных из различных источников, включая 3D-сканеры, что делает её удобным инструментом для обратного инжиниринга.

Основные функции КОМПАС-3D, полезные для обратного инжиниринга:

1. Импорт данных в форматах STL, IGES, STEP.
2. Инструменты для обработки и редактирования сеточных моделей.
3. Возможность создания параметрических моделей на основе импортированных данных.
4. Автоматическая генерация чертежей и КД.

Рассмотрим практический пример формирования цифровой модели имеющейся машиностроительной детали на основе технологии обратного инжиниринга на базе программного комплекса КОМПАС.

В качестве машиностроительного узла, для которого необходимо восстановить конструкторскую документацию, возьмем зубчатую передачу из двух колес (рисунок 1).



Рис. 1. Пара зубчатых колес, образующих зубчатое зацепление

Для разработки конструкторской документации (КД) на физическую деталь, в данном случае на зубчатое колесо, необходимо провести измерения искомого колеса и сопряженного с ним и определить все необходимые параметры. В принципе, все параметры колес можно определить на основе выполненных измерений по известным формулам, однако, гораздо более эффективно использовать встроенный в систему КОМПАС-3D модуль «Расчет механических передач», позволяющий на базе опорных размеров колеса определить все его параметры. На рисунке 2 – процесс открытия модуля «Расчет механических передач».

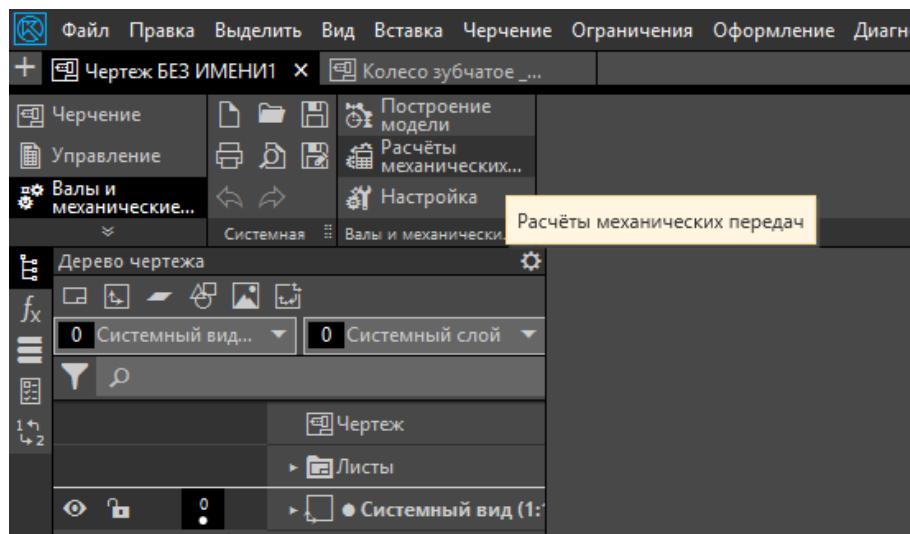


Рис. 2. Расположение модуля «Расчет механических передач» в системе КОМПАС

Далее выбираем «Цилиндрические передачи внешнего зацепления», к чему относится способ зацепления представленных шестеренок, затем выполняем геометрический расчет по диаметрам вершин зубьев. Откроется окно, представленное на рисунке 3:

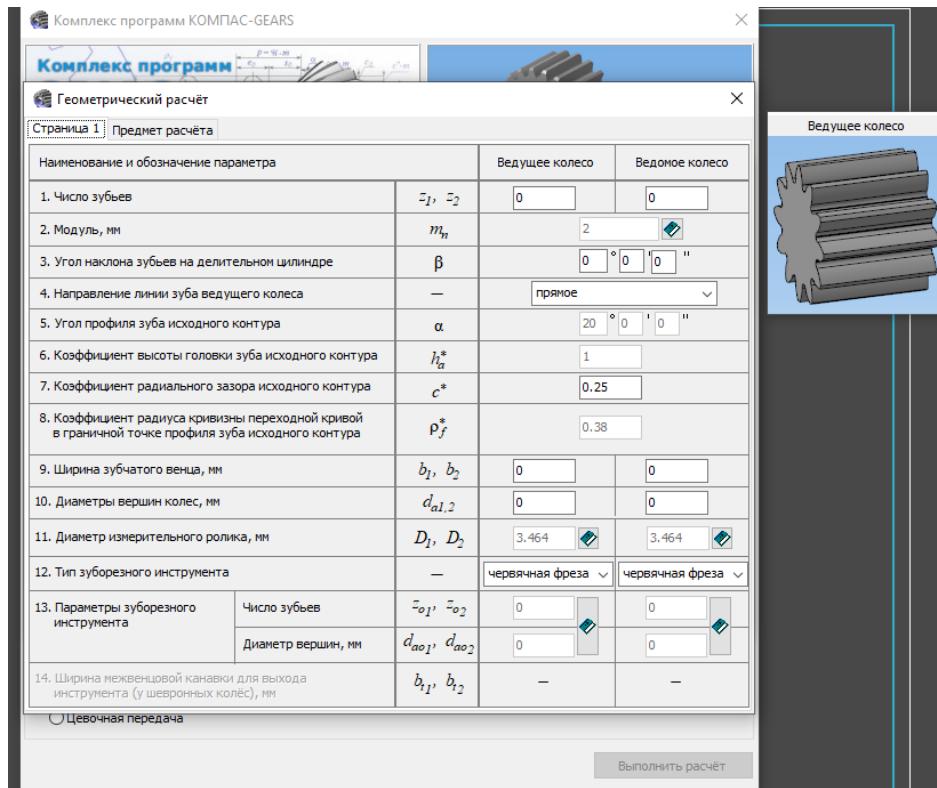


Рис. 3. Окно для заполнения параметров зубчатых колес

В качестве основного параметра зубчатого зацепления принят модуль зубьев  $m$ . Это расчетная величина, которую можно найти по нескольким формулам, в нашем случае удобно определить величину модуля по формуле высоты зуба:  $h = 2,25 * m$ , где  $h$  – высота зуба, а  $m$  – модуль. Так как измеренная величина  $h$  составила 4,5 мм, то

$$m = \frac{h}{2,25} = \frac{4,5}{2,25} = 2$$

Данный модуль входит в 1-й предпочтительный ряд по ГОСТ 9563-60 «Основные нормы взаимозаменяемости. Колеса зубчатые. Модули».

Измеренные значения количества зубьев колес  $z_1$  и  $z_2$  составили 24 и 48 соответственно.

Параметры исходного контура цилиндрических зубчатых колес – угол профиля зуба исходного контура  $\alpha$ , коэффициент высоты головки зуба исходного контура  $h_a$ , коэффициент радиального зазора исходного контура  $c$ , коэффициент радиуса кривизны переходной кривой в граничной точке профиля зуба исходного контура  $p_f$  – стандартизированы по ГОСТ 13755-2015.

Ширина зубчатого венца  $b_1$  и  $b_2$ , а также диаметры вершин колес  $d_{a1}$  и  $d_{a2}$  – измеренные значения.

После выполнения всех измерений и аналитического определения параметров колеса заполним таблицу в модуле GEARS системы Компас, она представлена на рисунке 4.

По кнопке «Расчет» запускаем процесс вычисления всех геометрических параметров колеса (рис. 5).

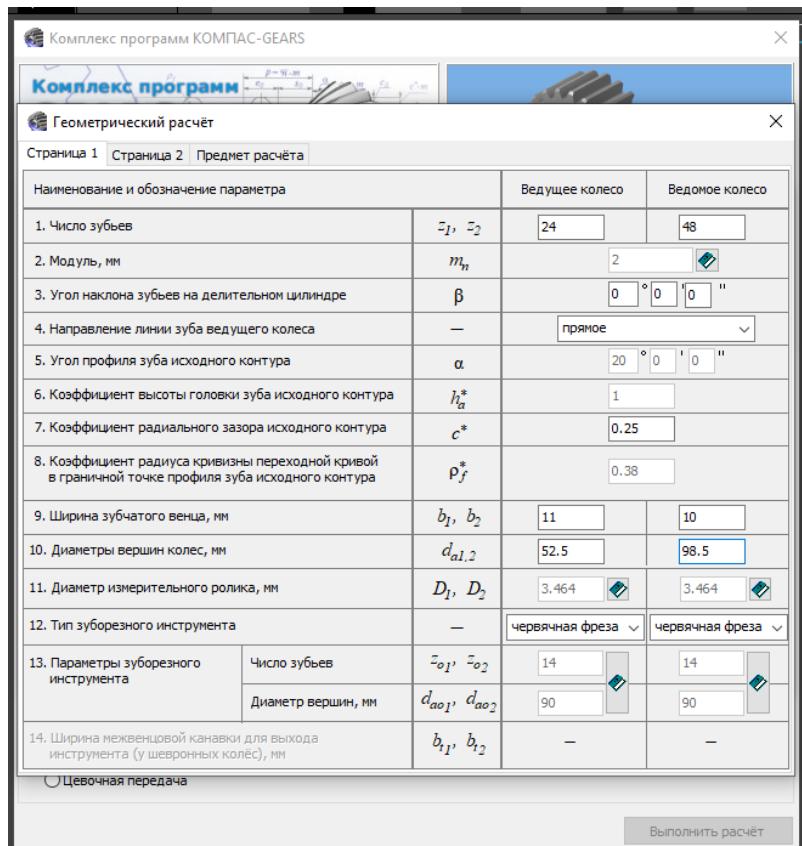


Рис. 4. Таблица модуля GEARS для задания параметров зубчатого колеса

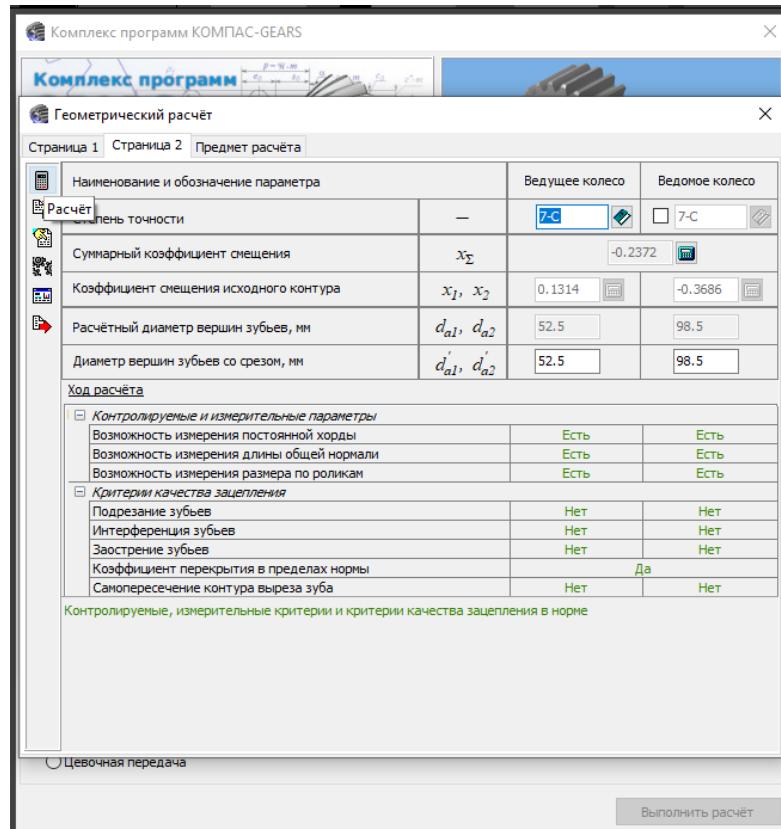


Рис. 5. Геометрический расчёт параметров в модуле GEARS системы Компас

Далее модуль позволяет создать визуализацию процесса зацепления (рис. 6). Благодаря ползунку в верхнем левом углу можно наглядно просмотреть весь процесс перемещения зубьев ведущего и ведомого колес, находящихся в зацеплении.

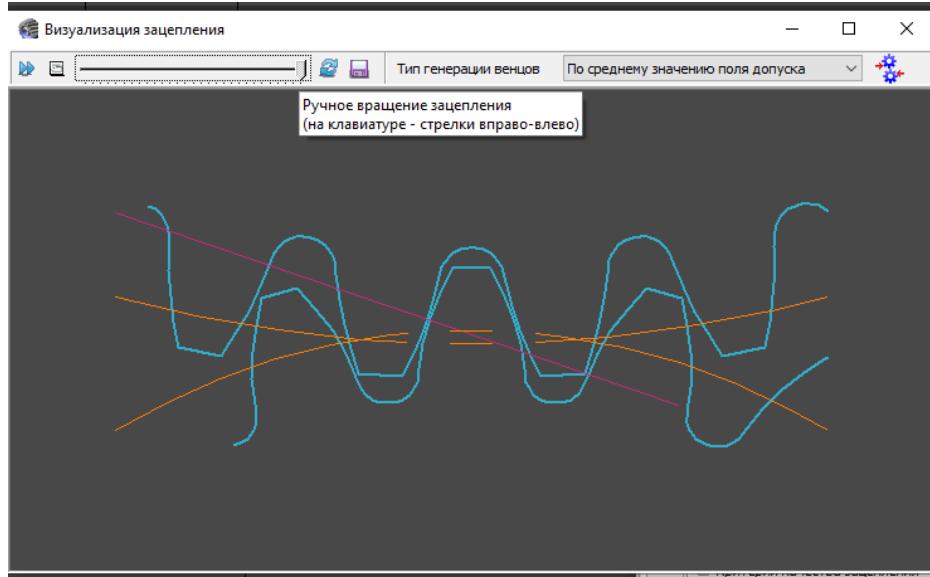


Рис. 6. Визуализация зацепления

Программа позволяет вывести результаты расчета в табличном виде, из которых можно выбрать все необходимые недостающие параметры для оформления КД (таблица 1).

Таблица 1. Геометрический расчёт цилиндрической зубчатой передачи внешнего зацепления

Наименование и обозначение параметра		Ведущее * <sup>1</sup> колесо	Ведомое * <sup>2</sup> колесо
<b>Исходные данные</b>			
Число зубьев	$z_1, z_2$	24	48
Модуль, мм	$m_n$	2	
Угол наклона зубьев на делительном цилиндре	$\beta$	0°00'00"	
Исходный контур	—	ГОСТ 13755-2015	
Угол профиля исходного контура	$\alpha$	20°00'00"	
Коэффициент высоты головки зуба исходного контура	$h_g^*$	1	
Коэффициент радиального зазора исходного контура	$c^*$	0,25	
Коэффициент радиуса кривизны переходной кривой в граничной точке профиля зуба исходного контура	$\rho_f^*$	0,38	
Ширина зубчатого венца, мм	$b$	11	10
Коэффициент смещения исходного контура	$x$	+0,1314	-0,3686
Степень точности	—	7-C	7-C
<b>Определяемые параметры</b>			
Передаточное число	$u$	2	
Межосевое расстояние, мм	$a_w$	$71,513 \pm 0,025$	
Делительный диаметр, мм	$d$	48	96
Диаметр вершин зубьев, мм	$d_a$	52,5	98,5
Диаметр впадин зубьев, мм	$d_f$	43,526	89,526
Начальный диаметр, мм	$d_w$	47,675	95,35
Основной диаметр, мм	$d_b$	45,105	90,21
Угол зацепления	$\alpha_{nw}$	18°53'54"	
<b>Контролируемые и измерительные параметры</b>			
Постоянная хорда, мм	$\bar{s}_c$	$2,943_{-0,13}^{+0,08}$	$2,3_{-0,14}^{+0,07}$
Высота до постоянной хорды, мм	$\bar{h}_c$	1,714	0,831
Радиус кривизны разноименных профилей зуба в точках, определяющих постоянную хорду, мм	$\rho_s$	9,774	17,641
Радиус кривизны активного профиля зуба в нижней точке, мм	$\rho_p$	3,386	9,729
Условие $\rho_s > \rho_p$ (возможность измерения постоянной хорды)	—	выполнено	выполнено
Число зубьев в длине общей нормали	$z_{W7}$	3	5
Длина общей нормали, мм	$W$	$15,613_{-0,125}^{+0,055}$	$27,409_{-0,14}^{+0,07}$

Продолжение табл. 1.

Наименование и обозначение параметра		Ведущее <sup>*1</sup> колесо	Ведомое колесо
Радиус кривизны разноимённых профилей зубьев в точках, определяющих длину общей нормали, мм	$r_w$	7,806	13,705
Радиус кривизны профиля в точке на окружности вершин, мм	$r_a$	13,433	19,776
Условие $r_p < r_w < r_a$ (возможность измерения длины общей нормали)	—	выполнено	выполнено
Диаметр измерительного ролика, мм	$D$	3,464	3,464
Угол профиля на окружности, проходящей через центр ролика	$\alpha_D$	25°04'08"	20°02'10"
Диаметр окружности, проходящей через центр ролика, мм	$d_D$	49,796	96,022
Радиус кривизны разноимённых профилей зубьев в точках контакта поверхности ролика с главными поверхностями зубьев, мм	$r_m$	8,817	14,717
Условие $r_p < r_m < r_a$ (возможность измерения размера по роликам)	—	выполнено	выполнено
Размер по роликам, мм	$M$	53,262 <sub>0,289</sub> <sup>0,151</sup>	99,486 <sub>0,376</sub> <sup>0,23</sup>
Условие $d_D + D > d_a$ (возможность измерения размера по роликам)	—	выполнено	выполнено
Условие $d_D - D > d_f$ (возможность измерения размера по роликам)	—	выполнено	выполнено
Нормальная толщина зуба по делительной окружности, мм	$s_n$	3,333 <sub>0,13</sub> <sup>0,06</sup>	2,605 <sub>0,14</sub> <sup>0,07</sup>
<i>Проверка качества зацепления по геометрическим показателям</i>			
Коэффициент наименьшего смещения	$x_{min}$	-0,404	-1,807
Условие отсутствия подрезания зуба исходной производящей рейкой	$x \geq x_{min}$	—	выполнено
Радиус кривизны в граничной точке профиля зуба, мм	$r_j$	3,129	8,414
Условие отсутствия подрезания	$r_j \geq 0$	—	выполнено
Диаметр положения нижней точки активного профиля зуба, мм	$d_p$	45,611	92,285
Диаметр положения точки пересечения эвольвенты с переходной кривой профиля зуба, мм	$d_\Pi$	45,537	91,767
Условие отсутствия инференции	$r_j \leq r_p$	—	выполнено
Нормальная толщина зуба на поверхности вершин, мм	$s_{na}$	1,36	1,655
Минимальное рекомендованное значение нормальной толщины зуба на поверхности вершин при поверхностном упрочнении зубьев, мм	$0,4 \cdot m_n$	0,8	
Условие отсутствия заострения	$s_{na} \geq 0,4 \cdot m_n$	—	выполнено
Удельное скольжение профилей зубьев в нижних точках активных профилей зубьев	$\theta_p$	-1,91981	-1,76131
Коэффициент торцового перекрытия	$\varepsilon_u$	1,702	
Рекомендованное минимальное значение коэффициента торцового перекрытия	—	1,2	
Коэффициент перекрытия	$\varepsilon_Y$	1,702	
Условие отсутствия самопересечения контура выреза зуба	—	выполнено	выполнено

После выполнения всех расчетов и измерений системой автоматически формируется чертеж, в который пользователь вводит параметры, необходимые для изготовления детали.

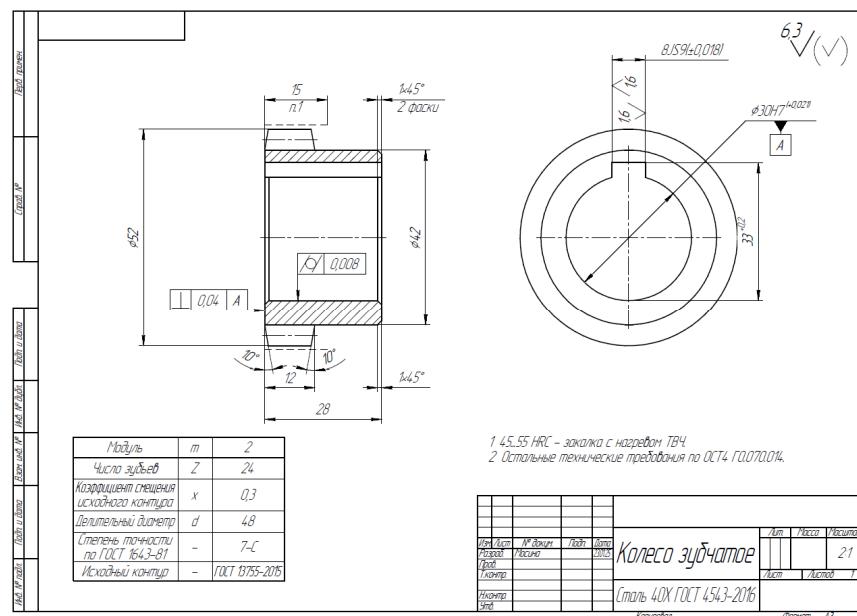


Рис. 9. КД на зубчатое колесо

## Библиографический список

1. Глушков, В. М. Основы проектирования автоматизированных систем / В. М. Глушков. — Москва: Наука, 1986. — 352 с.
2. Кошкин, В. А. Технологии реверс-инжиниринга: от теории к практике / В. А. Кошкин. — Санкт-Петербург: Питер, 2015. — 276 с.
3. Лапин, Н. И. Современные методы анализа и проектирования инженерных систем / Н. И. Лапин, Е. В. Зайцев. — Москва: Машиностроение, 2020. — 416 с.
4. Торопов, В. А. Компьютерные методы в машиностроении: автоматизация проектирования и анализа / В. А. Торопов, И. Н. Иванов. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — 368 с.
5. Руководство пользователя КОМПАС-3.
6. ГОСТ 2.109-73 Единая конструкторская документация. Основные требования к чертежам.
7. ГОСТ 9563-60 «Основные нормы взаимозаменяемости. Колеса зубчатые. Модули».
8. Миловзоров О. В., Мосина А. М. К вопросу обратного инжиниринга и его применения в разработке конструкторской документации

УДК 621.3.078.3; ГРНТИ 47.14.17

## УСТРОЙСТВО ГОРЯЧЕГО ЭКСТРУДИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЕЙ

К.Г. Сафаров, Д.А. Фролова, А.В. Бадын

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Российская Федерация, Томск, frolova\_d.a@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается процесс разработки устройства для горячего экструдирования полимерных материалов. Отмечена важность термостабилизации. Приведена блок-схема системы управления устройством горячего экструдирования. Снята калибровочная температурная зависимость сопротивления терморезистора. Приведена термометрия экструдера тепловизором. Изготовлен композитный полимер на основе акрилонитрилстиролакрилата и 10 масс.% мелкодисперсного углерода.

**Ключевые слова:** горячее экструдирование, автоматизация, экструдер, пластики, композитный филамент.

## HOT EXTRUSION DEVICE FOR POLYMERS FOR ADDITIVE MANUFACTURING WITH THERMOSTABILIZATION

K.G. Safarov, D.A. Frolova, A.V. Badin

National Research Tomsk State University,  
Russian Federation, Tomsk, frolova\_d.a@mail.ru

**The summary.** The paper discusses the process of developing a device for hot extrusion of polymer materials. The importance of thermal stabilization was noted. A block diagram of the control system for a hot extrusion device is shown. The calibration temperature dependence of the thermistor resistance has been removed. Thermometry of the extruder with a thermal imager is shown. A composite polymer based on acrylonitrile styrene acrylate and 10 wt.% dispersed carbon was manufactured.

**Keywords:** hot extrusion, automation, extruder, plastics, composite filament.

Индустрия 3D-печати послойным наплавлением материала (FDM) стремительно развивается и входит во многие сферы деятельности, являясь важным этапом в процессе работы над различными проектами [1-6]. Существует множество материалов для FDM 3D-принтеров, однако разработка новых композитных материалов для 3D-принтера [7-11] крайне необходима для улучшения электрофизических свойств изготавливаемых объектов. Сегодня промышленность предлагает большой выбор бытовых экструдеров для изготовления филаментов для 3D принтеров, но их стоимость довольно высока и требуется большой объем исходного сырья. Существует интерес в снижении затрат на исследования, уменьшении количества используемого материала.

Одним из способов изготовления филаментов на основе полимеров является метод продавливания расплавленного полимерного материала в виде гранул [12] или агломерата через формирующее отверстие при помощи экструдера (рис. 1).

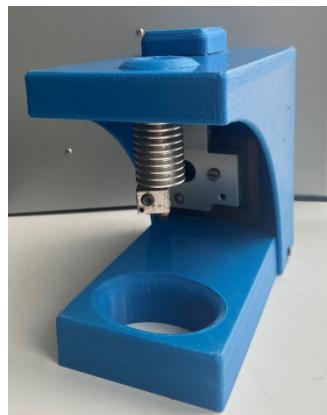


Рис. 1. Внешний вид экструдера филаментов

Устройство экструдирования полимеров представляет из себя полость, в которую загружаются гранулы, либо измельченные фрагменты композиционного материала. Этот материал механически проталкивается штоком в канал до экструзионной головки, где с помощью нагревателя происходит процесс плавления. Для того, чтобы нить не расплавилась слишком рано, верхняя часть сопла охлаждается с помощью радиатора. Процесс формирования филамента происходит в фильтре, где под давлением расплавленный композит проходит через круглое отверстие определённого диаметра.

Регулировка температуры в процессе экструзии материала очень важна, так как при перегреве материала может произойти пиролиз (разложение пластика), что способствует потере свойств самого материала и забиванию сопла. Для решения задачи поддержания температуры экструзии в процессе изготовления филамента было разработано устройство (рис. 2).

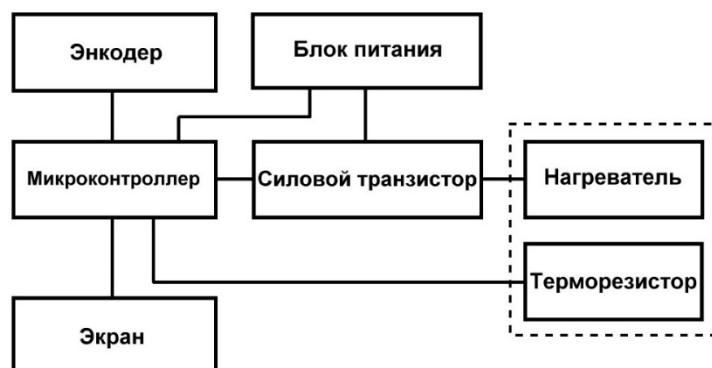


Рис. 2. Блок – схема устройства горячего экструдирования полимеров для аддитивного производства с термостабилизацией

Блок питания обеспечивает требуемое напряжение (5В постоянного тока) для микроконтроллера (ATmega 328P) и силового транзистора нагревателя экструдера. Необходимая для изготовления филамента температура задаётся механическим энкодером и отображается на экране вместе с текущей температурой. Обратная связь для термостабилизации представлена терморезистором с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (100 кОм при 25 °C).

Внешний вид собранного блока управления устройством горячего экструдирования представлен на рисунке 3.

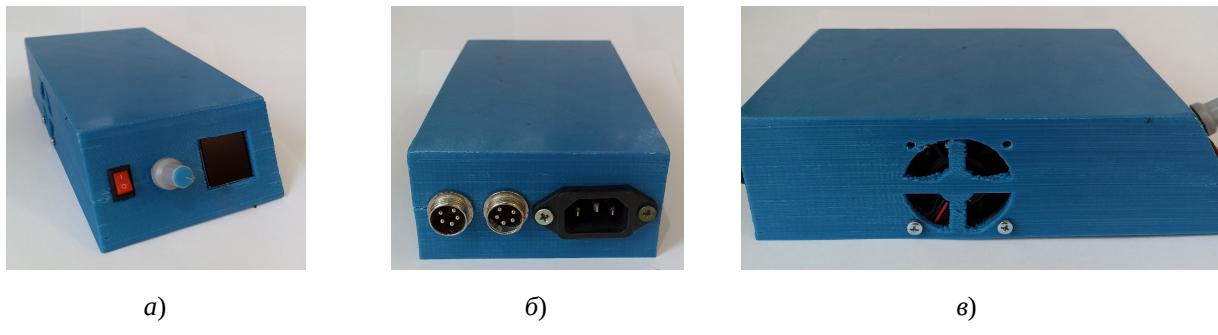


Рис. 3. Внешний вид модуля управления системой горячего экструдирования:  
а) – фронтальная сторона, б) – тыловая сторона, в) – боковая сторона

На задней панели имеются разъемы для подключения к сети переменного тока и экструдера.

Для реализации возможности контроля температуры экструдера была измерена температурная зависимость сопротивления терморезистора (рис. 4).

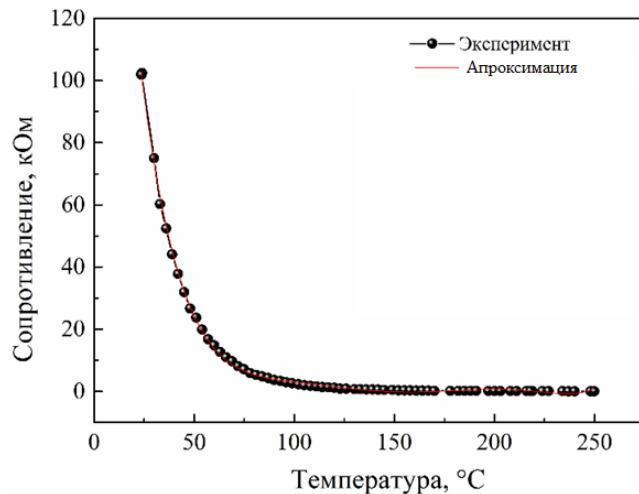


Рис. 4. Калибровочная температурная зависимость сопротивления терморезистора

Путем аппроксимации для алгоритма управления устройством был получен полином для сопоставления температуры и сопротивления терморезистора в составе входного делителя напряжения аналогово-цифрового преобразователя микроконтроллера. Контроль температуры тепловизором (рис. 5) показал согласование с заданной температурой (220 °C) на устройстве.

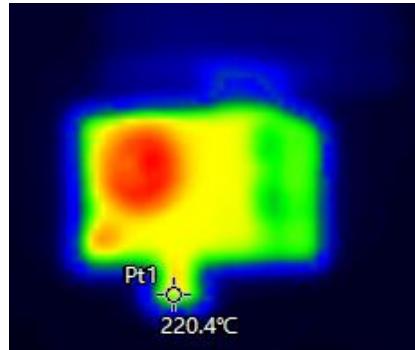


Рис. 5. Термометрия экструдера тепловизором

Проверка работоспособности устройства проводилась путем изготовления композиционного филамента на основе акрилонитрилстиролакрилата и 10 масс.% мелкодисперсного углерода (рис. 6).

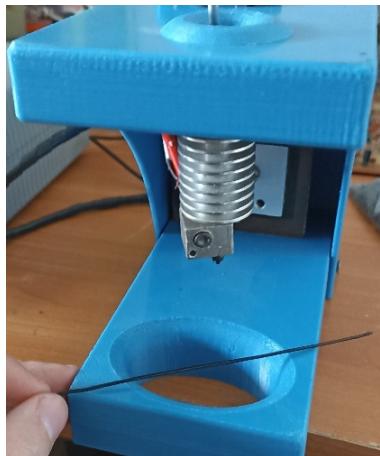


Рис. 6. Образец изготовленного композиционного филамента на основе акрилонитрилстиролакрилата и 10 масс.% мелкодисперсного углерода

Устройство готово выполнять поставленные задачи и учитывает в себе важные параметры: работа с таким устройством получается недорогой, с малым количеством отходов при печати, учитывая фактор термостабилизации композитные филаменты будут сохранять свои механо-прочностные и электрофизические свойства.

Результаты получены в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов» Национального исследовательского Томского государственного университета.

### **Библиографический список**

1. Sai Saran O. и др. 3D printing of composite materials: A short review // Mater. Today Proc. – 2022. – Vol. 64. – P. 615–619.
2. Aloqalaa Z. Electrically conductive fused deposition modeling filaments: current status and medical applications // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – №. 8. – P. 1055.
3. Anerao P., Kulkarni A., Munde Y. A review on exploration of the mechanical characteristics of 3D-printed biocomposites fabricated by fused deposition modelling (FDM) // Rapid Prototyping Journal. – 2024. – Vol. 30. – №. 3. – C. 430-440.
4. Смирнов В. В. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство / В.В. Смирнов, Е.Ф. Шайхутдинова // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2013. – Т.2, № 2. – С. 90-94.
5. Финогеев Д. Ю. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения / Д.Ю. Финогеев, О.П. Решетникова // Вестник СГТУ. – 2020. – № 3. – С. 63-71.
6. Смурров И. Ю. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность / И.Ю. Смурров, С.Г. Конов, Д.В. Котобан // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 11-22.
7. Vertoprakhov I. A. et al. Composite Polymer Material Based on Hexaferrite with Selective Absorption in the EHF Range for 3D-Printing Technology // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2023. – P. 210-214.
8. Дожделев А. М. Обзор расходных материалов для 3d печати методом послойного наплавления / А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – Т.8, № 2. – С. 1-3.
9. Karimi A., Rahmatabadi D., Baghani M. Various FDM mechanisms used in the fabrication of continuous-fiber reinforced composites: a review // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – No. 6. – P. 831.

10. Mogan J. et al. Thermo-mechanical properties of ABS/stainless steel composite using FDM //Materials Today: Proceedings. – 2024. – Vol. 109. – P. 120-125.
11. Huang C. et al. Influences of heat treatment on mechanical properties of SCF/PEEK composites in FDM-3D printing process with UV laser assistance //Polymer Composites. – 2024. – Vol. 45. – No. 14. – P. 12597-12610.
12. К. Кремзер Р. А. Система горячего экструдирования тестовых филаментов для 3D-принтера: дипломная работа / Р.А. Кремзер. – Томск, 2020 – 43с.

УДК 621.01; ГРНТИ 55.01.77

## ПАКЕТ ELMER КАК МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ СТЕКА ИНСТРУМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ САЕ-СИСТЕМ

И.Н. Романов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [inromanov.live@yandex.ru](mailto:inromanov.live@yandex.ru)

**Аннотация.** Пакет Elmer - это конечно-элементное программное обеспечение для мультифизических задач. Elmer предоставляет мощный и гибкий инструмент для моделирования и решения широкого спектра технических задач. Его открытый исходный код и активное сообщество делают его привлекательным вариантом для исследователей, инженеров и студентов. Архитектура Elmer построена на модулях, что упрощает добавление новых физических моделей и пользовательских алгоритмов. Это позволяет адаптировать инструмент под конкретные задачи и проводить эксперименты с различными подходами.

**Ключевые слова:** системы инженерного анализа (САЕ), конечно-элементный анализ (FEA/FEM), алгоритмы и реализации различных физических моделей, теплопередача, гидродинамика, электромагнетизм, механика деформируемого тела.

## ELMER PACKAGE AS A METHOD FOR STUDYING THE STACK OF TOOLS OF MODERN CAE-SYSTEMS

I.N. Romanov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [inromanov.live@yandex.ru](mailto:inromanov.live@yandex.ru)

**The summary.** Elmer is a finite element software for multiphysics problems. Elmer provides a powerful and flexible tool for modeling and solving a wide range of engineering problems. Its open source code and active community make it an attractive option for researchers, engineers, and students. Elmer's architecture is built on modules, which makes it easy to add new physics models and custom algorithms. This allows you to tailor the tool to specific problems and experiment with different approaches.

**Keywords:** computer-aided engineering (CAE), finite element analysis (FEA/FEM), algorithms and implementations of various physical models, heat transfer, hydrodynamics, electromagnetism, mechanics of deformable bodies.

Современные САЕ-системы опираются на широкий стек инструментов, который охватывает все этапы моделирования, анализа и оптимизации. Этот стек инструментов постоянно развивается, появляются новые методы и алгоритмы, направленные на повышение точности, скорости и автоматизации САЕ-анализа. Выбор конкретных инструментов зависит от типа задачи, требований к точности и доступных ресурсов. Одна из ключевых тенденций развития САЕ-систем мультифизичность: моделирование сложных систем, учитывающих взаимодействие различных физических явлений [1, 2].

Elmer - это мощный конечно-элементный пакет (Finite Element Method - FEM) с открытым исходным кодом. Он может быть использован для решения широкого спектра физических задач:

- **Механика твердого тела:**
  - Статика и динамика
  - Анализ напряжений и деформаций

- Термомеханика
- Анализ колебаний
- **Гидродинамика:**
  - Ламинарное и турбулентное течение
  - Теплопередача в жидкостях
  - Многофазное течение
  - Течение в пористых средах
- **Теплопередача:**
  - Проводящая, конвективная и лучистая теплопередача
  - Фазовые переходы
  - Термическое сопротивление контактов
- **Электромагнетизм:**
  - Статические и динамические электромагнитные поля
  - Электростатика и магнитостатика
  - Волновые процессы
  - Моделирование антенн и волноводов
- **Акустика:**
  - Распространение звуковых волн
  - Анализ вибраций
- **Химия:**
  - Транспорт и реакции химических веществ
  - Электрохимия

Основные возможности и преимущества Elmer:

- **Многофизичность:** Возможность моделировать взаимодействия между различными физическими явлениями.
- **Гибкость:** Поддержка различных методов конечно-элементного анализа и решателей.
- **Масштабируемость:** Способен работать с большими и сложными моделями.
- **Интеграция с другими инструментами:** Интеграция с другими инструментами моделирования, такими как CAD программы (например, FreeCAD) и инструменты постобработки (например, ParaView).
- **Открытый исходный код:** Позволяет пользователям модифицировать и расширять функциональность пакета.

Основные компоненты CAE-систем и их взаимодействие можно представить в виде последовательного процесса, состоящего из нескольких ключевых этапов. Каждый этап требует использования специализированных инструментов и имеет свои особенности.

Таким образом, CAE-системы представляют собой интегрированный набор инструментов, позволяющих моделировать, анализировать и оптимизировать инженерные объекты и системы. Эффективное использование этих инструментов требует глубокого понимания их принципов работы и взаимодействия, а также знания физических процессов, происходящих в исследуемом объекте.

Elmer - отличный инструмент для изучения современных CAE-систем по целому ряду причин:

- *Современные CAE-системы* - это “черные ящики” для большинства пользователей. Они предоставляют интерфейс, но что происходит внутри - скрыто. Elmer раскрывает эти «внутренности». Это даёт гораздо более глубокое понимание того, как работает CAE, чем просто использование коммерческого продукта.
- *Разбор алгоритмов:* можно детально изучить алгоритмы решения уравнений, методы дискретизации, способы обработки граничных условий. Это крайне важно для понимания ограничений и возможностей различных методов.

- *Возможность модификации:* конкретную функцию или модель можно изменить, добавить логирование, провести отладку. Это уникальная возможность для обучения.

Последовательность решения задач в Elmer обычно состоит из следующих этапов:

### 1. Препроцессинг (Создание модели):

- *Определение геометрии:* Создание или импорт геометрии модели. Можно использовать CAD-программы (например, FreeCAD) и импортировать геометрию в ElmerGUI или использовать возможности генерации геометрии непосредственно в ElmerGUI (ограниченные).
- *Разбиение на конечные элементы (Meshing):* Разбиение геометрии на множество маленьких элементов (треугольников, тетраэдров, и т.д.). Качество сетки напрямую влияет на точность результатов. Elmer интегрируется с внешними mesh-генераторами (например, Netgen, Gmsh) для создания качественных сеток.
- *Определение материалов:* Задание физических свойств материалов, используемых в модели (плотность, теплопроводность, модуль Юнга, и т.д.).
- *Задание граничных условий:* Определение условий на границах модели. Это может быть заданная температура, давление, скорость, электрический потенциал, сила и т.д. Граничные условия определяют поведение модели на её границах.
- *Задание начальных условий:* Определение начального состояния модели (например, начальная температура, скорость). Начальные условия необходимы для решения нестационарных задач.
- *Определение физических моделей:* Выбор и настройка физических моделей, которые будут использоваться для решения задачи (например, теплопередача, гидродинамика, механика твердого тела). Каждая физическая модель имеет свои собственные параметры и уравнения.
- *Сохранение проекта Elmer:* Сохранение всей информации о модели в формате Elmer (обычно это .sif файл - Solver Input File, и файлы с сеткой, обычно .mesh или .unv). Sif-файл является текстовым файлом, описывающим все параметры решения.

### 2. Решение:

- *Запуск решателя Elmer:* Запуск решателя Elmer для решения системы уравнений, описывающих физические процессы в модели. Решатель выполняет численные расчеты и итерации до достижения сходимости. Решатель запускается через командную строку или через графический интерфейс ElmerGUI.
- *Контроль за ходом решения:* Мониторинг процесса решения. ElmerGUI или другие инструменты могут использоваться для отображения информации о сходимости, количестве итераций и других параметрах. Важно убедиться, что решение сходится и не имеет ошибок.

### 3. Постпроцессинг (Анализ результатов):

- *Визуализация результатов:* Отображение результатов решения (например, распределение температуры, скорости, напряжений) с помощью программ постобработки (например, ParaView). Визуализация помогает понять поведение модели и выявить проблемные области.
- *Анализ данных:* Извлечение числовых данных из результатов решения и их анализ. Это может включать расчет средних значений, интегралов, максимумов и минимумов.
- *Верификация и валидация:* Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными или аналитическими решениями для проверки их точности и достоверности. Этот этап важен для подтверждения корректности модели.

- *Создание отчетов и презентаций:* Подготовка отчетов и презентаций с результатами моделирования.

ElmerGUI — это графический пользовательский интерфейс для программного пакета Elmer. Программа способна импортировать файлы конечно-элементной сетки в различных форматах, генерировать конечно-элементное разбиение для различных входных файлов геометрии, настраивать PDE-системы для решения и экспортить данные модели и результаты для ElmerSolver.

Elmer можно использовать и без графического пользовательского интерфейса, но использование ElmerGUI обеспечивает эффективный путь к пониманию этапов решения физических задач реализуемых в современных CAE-системах.

#### Детализация этапов:

*Геометрия модели:* Геометрия модели может быть импортирована из CAD-программ в форматах STEP, IGES, BREP.

*Сетка:* Сетка для решения задач FEM-методом может быть сгенерирована непосредственно в Elmer или создана в специализированных программах. Elmer позволяет модифицировать сетку для достижения удовлетворительной геометрической точности (рис. 1).

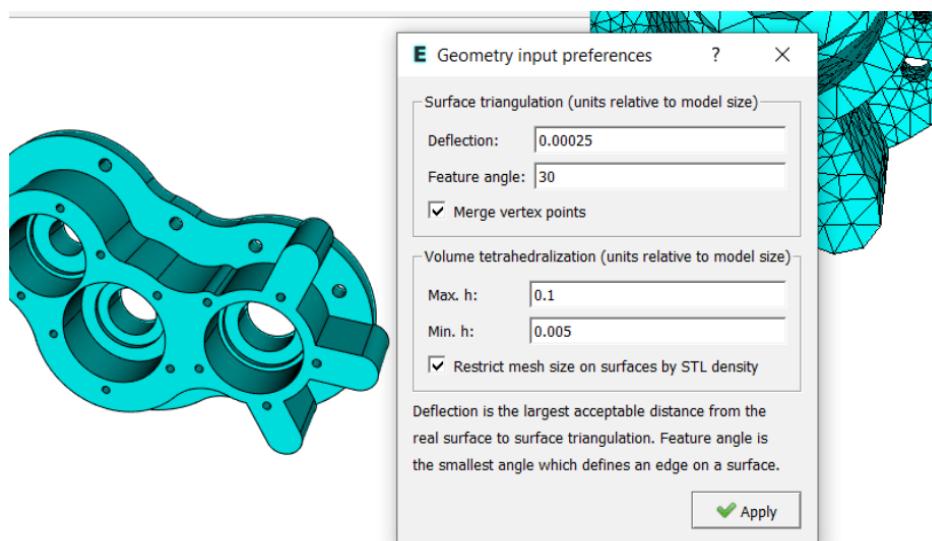


Рис. 1. Изменение параметров сетки

*Решатель:* Elmer предлагает различные решатели для разных типов задач. Выбор правильного решателя может повлиять на скорость и сходимость решения (рис. 2).

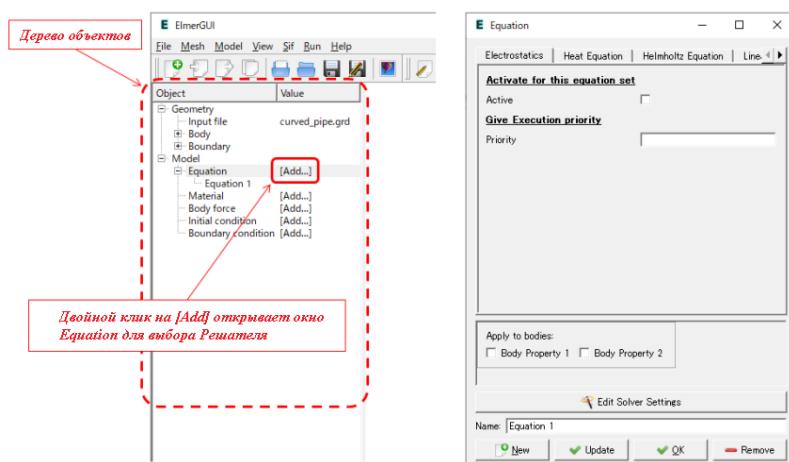


Рис. 2. Окно выбора решателя

При моделировании взаимодействия между различными физическими процессами могут быть одновременно активированы различные Решатели на соответствующих вкладках.

Выбор правильной физической модели для задачи является важным. Например, для турбулентного течения необходимо использовать подходящую модель турбулентности.

**Материалы:** Данные о материалах должны быть точными и соответствовать условиям задачи. Использование неправильных данных о материалах может привести к неверным результатам. Редактор свойств материала появится при двойном клике «Material» в обозревателе объектов или может быть вызван из меню: *Model → Material → Add...*.

**Объемные силы:** Пункт меню: *Model → Body force → Add...* позволяет задавать объемные силы, которые необходимо учитывать при решении.

**Начальные условия:** Пункт меню: *Model → Initial condition → Add...* позволяет задавать начальные условия.

**Границочные условия:** Правильно заданные граничные условия являются ключевым для получения корректных результатов. Неправильные граничные условия могут привести к нефизичным или некорректным результатам (рис. 3, 4).

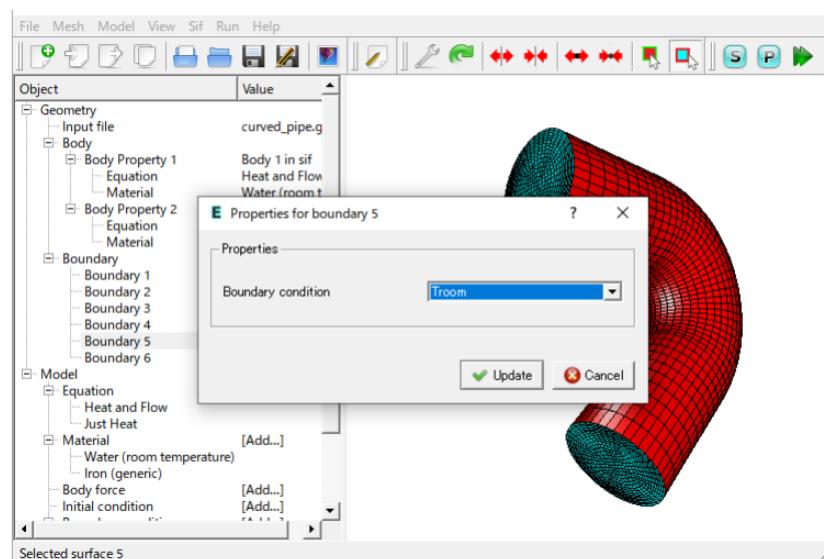


Рис. 3. Редактор свойств границы активируется при удерживании клавиши Alt и двойном щелчке по поверхности.

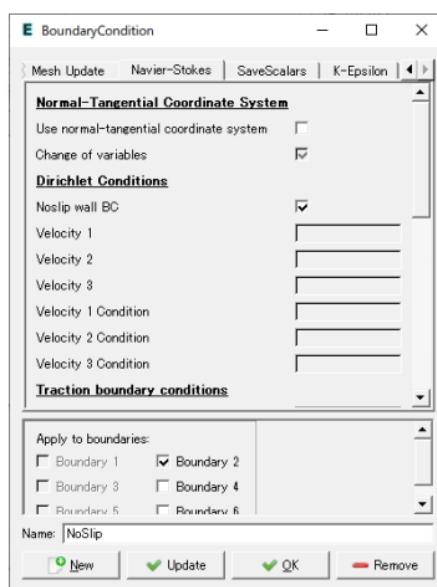


Рис. 4. Окно свойств граничных условий

**Решение и постобработка:** Содержимое меню «Модель» передается решателю в виде входного файла решателя. Входной файл решателя генерируется путем выбора: *Sif* → *Generate*. После запуска решателя (рис. 5) появится окно журнала решателя, в котором будет показан журнал. В конце концов решатель запишет файл результата для постпроцессора в каталоге проекта. Имя файла результата определяется в *Model* → *Setup...*

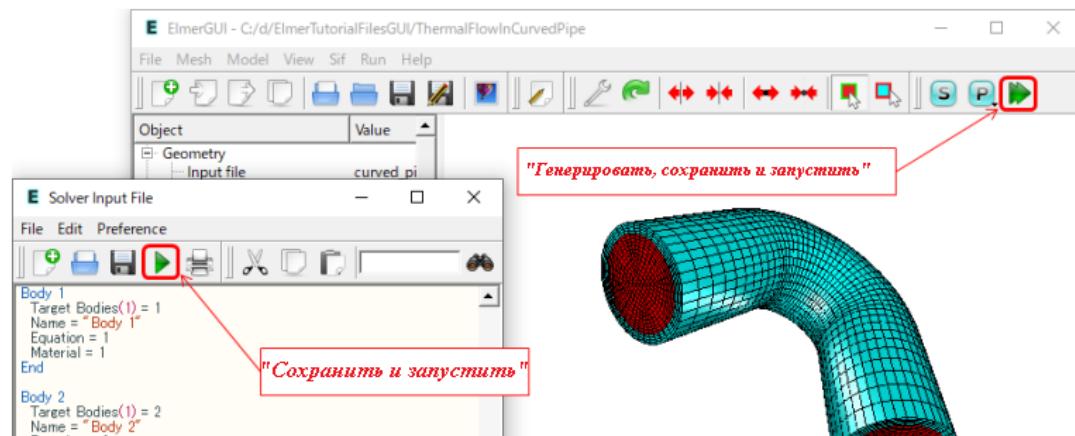


Рис. 5. Кнопки для запуска решения

ElmerVTK — простой в использовании постпроцессор, который имеет смысл использовать для первого взгляда на результаты моделирования Elmer (рис. 6).

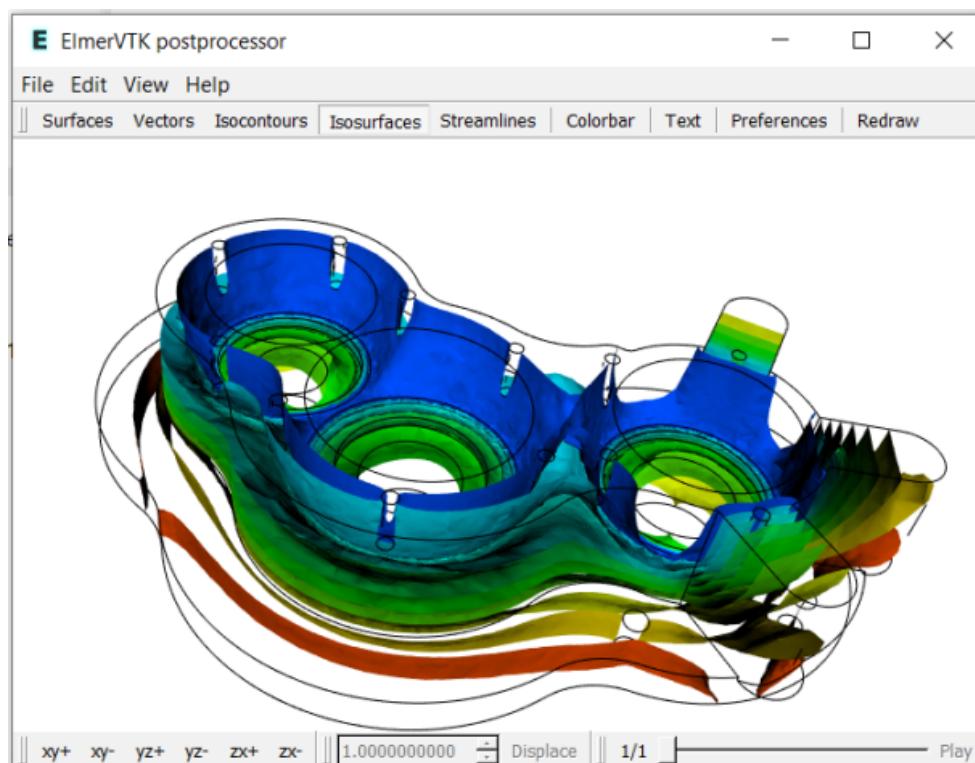


Рис. 6. ElmerVTK

ParaView – мощный инструмент для визуализации и анализа результатов. Он позволяет создавать различные типы графиков, контурные карты и векторные поля. ElmerVTK создает файлы необходимые для анализа результатов решения в ParaView.

## Заключение

Elmer, безусловно, не является заменой всем коммерческим CAE-системам. У него могут быть ограничения в некоторых областях. Однако, для изучения принципов работы, алгоритмов и архитектуры современных CAE-систем, а также для проведения экспериментов и разработки пользовательских моделей, он предоставляет уникальные возможности, недоступные при использовании только коммерческих продуктов. Это отличный выбор для тех, кто хочет не просто “нажимать кнопки”, а действительно понимать, что происходит “под кожей”.

## Библиографический список

1. Никитюк Ю. В., Середа А. А., Самофалов А. Л., Введение в технологии компьютерного моделирования. CALS/PLM, CAE-системы: практическое руководство. – Гомель: Гомельский государственный университет им.Ф.Скорины, 2023.
2. Поляков А. Н., Никитина И. П., Применение CAE-систем в математическом моделировании станков. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021.

УДК 658.512.4; ГРНТИ 55.16.17

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИПУСКОВ И ДОПУСКОВ НА РАЗМЕРЫ СТАЛЬНЫХ ПОКОВОК

Е.В. Преображенский, В.И. Галкин, Е.Е. Маркелов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация, Москва, markelov.egor2013@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с автоматизацией процесса проектирования формы поковок для горячей объемной штамповки. Для увеличения производительности работы инженера-технолога на этапе технологической подготовки производства предложен программный модуль, позволяющий назначать припуски на механическую обработку и допуски на размеры стальных поковок. Выбор соответствующих величин осуществляется на основе ГОСТ с учетом марки материала, массы детали и её сложности. При необходимости отдельные параметры могут быть скорректированы вручную. Разработанный на языке программирования Visual Basic for Application модуль встраивается в электронные таблицы Excel. Продемонстрировано, что данное решение открывает широкие возможности по использованию его в связке с системой автоматизированного проектирования SolidWorks, в некоторых случаях существенно ускоряя создание моделей штамповой оснастки.

**Ключевые слова:** форма поковки, горячая объемная штамповка, проектирование штамповой оснастки, программирование, VBA, SolidWorks.

## DEVELOPMENT OF A SOFTWARE MODULE FOR DETERMINING ALLOWANCES AND DIMENSIONAL TOLERANCES FOR STEEL FORGINGS

E.V. Preobrazhenskii, V.I. Galkin, E.E. Markelov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia, Moscow  
markelov.egor2013@yandex.ru

**The summary.** The article deals with the issues related to the automation of the process of designing the shape of forgings for hot forging. In order to increase the productivity of the industrial engineer at the stage of technological preparation of production, a specialized software module is proposed, which allows assigning machining allowances and dimensional tolerances for steel forgings. The corresponding values are selected on the basis of State Standard, taking into account material grade, part weight and its complexity. If necessary, individual parameters can be adjusted manually. The module developed in Visual Basic for Application programming language can be integrated into Excel spreadsheets. It has been demonstrated that this solution opens wide possibilities for its application in conjunction with the SolidWorks computer-aided design system, in some cases significantly accelerating the creation of forging die models.

**Keywords:** forgings shape, hot metal forging, die design, programming, VBA, SolidWorks.

Несмотря на стремительное развитие информационных технологий, проектирование формы поковок остается одним из наиболее важных этапов при разработке технологических процессов штамповки. Инженеру-технологу требуется учесть множество факторов, чтобы, в конечном счете, получить заданные механические и эксплуатационные свойства готовой детали, а также обеспечить низкую себестоимость её производства.

Разработка чертежа поковки опирается на анализ геометрии чистовой детали с учетом припусков на механическую обработку и усадки металла при охлаждении [1]. Определяются оптимальные размеры и форма поковки для обеспечения наилучшего коэффициента использования материала и минимальных затрат на обработку. Принимаются во внимание планируемые операции технологического процесса штамповки, имеющиеся на предприятии оборудование, опыт по конструированию штамповой оснастки.

Основные проблемы при проектировании формы поковки связаны с обеспечением качества получаемого изделия. С одной стороны, геометрия поковки должна быть максимально приближена к форме готовой детали, чтобы минимизировать затраты на механическую обработку. Однако при этом необходимо учитывать технологические особенности и ограничения процесса штамповки, например, минимальные радиусы закруглений, штамповочные уклоны и пр. Кроме того, следует обеспечить равномерность деформации металла, от которой во многом зависят окончательные механические свойства. При правильном выборе формы поковки максимально уменьшается вероятность образования дефектов в виде складок, поверхностных трещин и др. Учитывается усадка металла при охлаждении, влияющая на соответствие размеров готовой детали тем, что указаны на чертеже. Конструкция штампов должна обеспечивать не только точное формообразование поковки, но и долговечность инструмента. Следовательно, разработка формы поковки и проектирование на её основе ручья штампа является сложной задачей, требующей опыта и знаний в области материаловедения и технологии обработки металлов давлением [2].

Необходимо отметить, что с появлением систем автоматизированного проектирования и прикладных пакетов инженерного анализа (CAD/CAE-систем) многие задачи по разработке формы поковки существенно упростились [3]. Использование CATIA, Siemens NX, SolidWorks, Компас-3D, T-Flex CAD позволило в автоматизированном режиме создавать модели штамповых ручьев. А применение метода конечных элементов в QForm, SFTC Deform, Simufact Forming – моделировать процесс штамповки, анализировать течение и напряженно-деформированное состояние металла, тем самым оптимизировать как технологические параметры, так и форму поковки, заранее, до изготовления оснастки, определяя зоны затрудненного заполнения штампа и возможные области недоштамповки.

В то же время приложения российских разработчиков, учитывающих особенности ГОСТ и направленных на проектирование формы стальных поковок, практически отсутствуют. Инженер-технолог обычно вынужден либо обращаться к бумажным данным из отраслевых стандартов, либо при наличии использует собственные решения компании на основе электронных таблиц [4]. Хотя это и не специализированное программное обеспечение, но часто предприятия, занимающиеся кузнецко-штамповочным производством, разрабатывают свои собственные приложения для расчета припусков и допусков с учетом конкретных процессов, материалов и оборудования. Помимо отраслевых стандартов такие инструменты базируются на статистическом анализе собственных опытных данных о фактических размерах поковок, поэтому удается определить надежные значения припусков и допусков.

Отметим, что согласно ГОСТ 7505-89 "припуск – слой металла на обрабатываемых частях поверхности поковки, удаляемый при её механической обработке". Этот дополнительный металл добавляется к номинальным размерам поковки. Он необходим, чтобы при последующей механообработке удалить поверхностный слой с дефектами (окалиной, обезуглероженным слоем, мелкими трещинами) и обеспечить требуемую точность и чистоту поверхности готовой детали.

Назначение припусков и допусков – это компромисс между несколькими противоречивыми требованиями. Рассматривается как минимизация затрат на материал и механическую обработку, так и обеспечение требуемого качества поверхности и точности размеров

готовой детали. Чем меньше припуск, тем меньше металла уходит в отходы при механической обработке, и тем меньше времени и усилий требуется на её выполнение. Однако слишком жесткие допуски на размеры могут значительно увеличить стоимость изготовления поковки. Кроме того, припуск должен быть достаточным для удаления всех возможных поверхностных дефектов и учитывать усадку металла при неравномерном охлаждении. Процесс штамповки на различном оборудовании имеет свои ограничения по точности и форме. Невозможно изготовить поковку с точностью, сравнимой с механической обработкой [5].

Исходя из сказанного, ГОСТ 7505-89 предлагает использовать несколько таблиц для назначения рекомендуемых припусков и допусков на поковку. В этих таблицах определяемые величины зависят от множества факторов, включая марку материала (группу стали), размеры детали и ее массу, класс точности, способ штамповки (открытая или закрытая) и используемое оборудование, положение линии разъема. Иногда, особенно у студентов и начинающих специалистов, появляются сложности при использовании таблиц. Часто фактический размер или чистота поверхности детали не совпадает с размерами, указанными в таблице. В этом случае необходимо корректно выбрать требуемый диапазон значений. Этот этап может приводить к ошибкам из-за утомления при работе с большим числом данных. Также важен выбор правильного класса точности, т.е. найти компромисс между стоимостью и качеством. Слишком высокий класс точности может привести к неоправданному увеличению стоимости, а слишком низкий – к несоответствию требованиям к готовой детали. После проектирования поковки её масса может не соответствовать предварительно рассчитанной, в таком случае приходится заново назначать все припуски и допуски. Следовательно, задача по автоматизации их выбора с учетом отечественных стандартов является крайне актуальной.

Для увеличения производительности и снижения вероятности ошибок, совершаемых инженером-технологом при назначении припусков и допусков на поковку, предложен программный модуль с графическим интерфейсом пользователя (рис. 1).

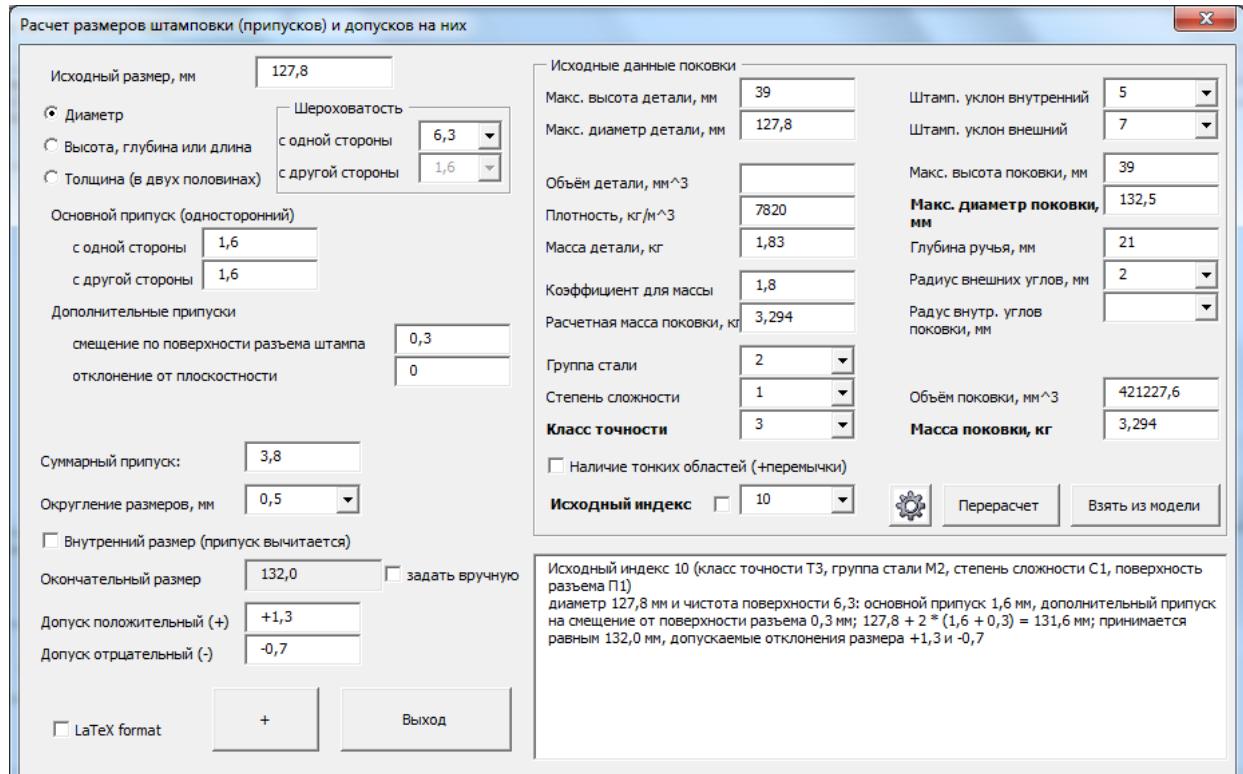


Рис. 1. Графический интерфейс разработанного модуля для ввода исходных данных поковки

В качестве языка программирования использован Visual Basic for Application в Microsoft Excel. Такой выбор обусловлен возможностью сохранять и при необходимости редак-

тировать исходные табличные данные в знакомой среде, а также совместимостью с системой автоматизированного проектирования SolidWorks.

При работе с модулем необходимо указать обязательные параметры: предполагаемую массу поковки, её габаритные размеры, исходный индекс и класс точности. Задавая чистоту поверхности, можно автоматически получить основной и дополнительный припуск на сторону. Если есть необходимость, принятый размер редактируется. Затем назначаются допуски, которые учитывают, что отклонения внутренних размеров поковок устанавливаются с обратными знаками. По желанию инженера-технолога формируется журнал со всеми назначенными размерами и расчетной формулой. Описание с выбранным исходным индексом предназначено для копирования в технические требования чертежа поковки.

Одно из важных преимуществ предложенного модуля заключается в том, что его можно использовать для назначения припусков и допусков для различных сложных деталей, при необходимости корректируя основные коэффициенты в соответствующих таблицах Excel. При этом из любой ячейки допускается вызов функции модуля с переданными обязательными аргументами, т.е. выполняется автоматизированный расчет без участия человека. Таким образом, упрощается проектирование формы поковки для группового технологического процесса. Если создание модели, например, в SolidWorks велось с использованием конфигураций, для которых разрешены зависимости между формулами Excel, то перестроение всей геометрии для перехода к новому типоразмеру осуществляется простым переключением вариантов. Припуски будут назначаться по формуле из разработанного модуля, тем самым корректно, в соответствии с ГОСТ 7505-89, вносятся изменения в форму поковки (рис. 2).

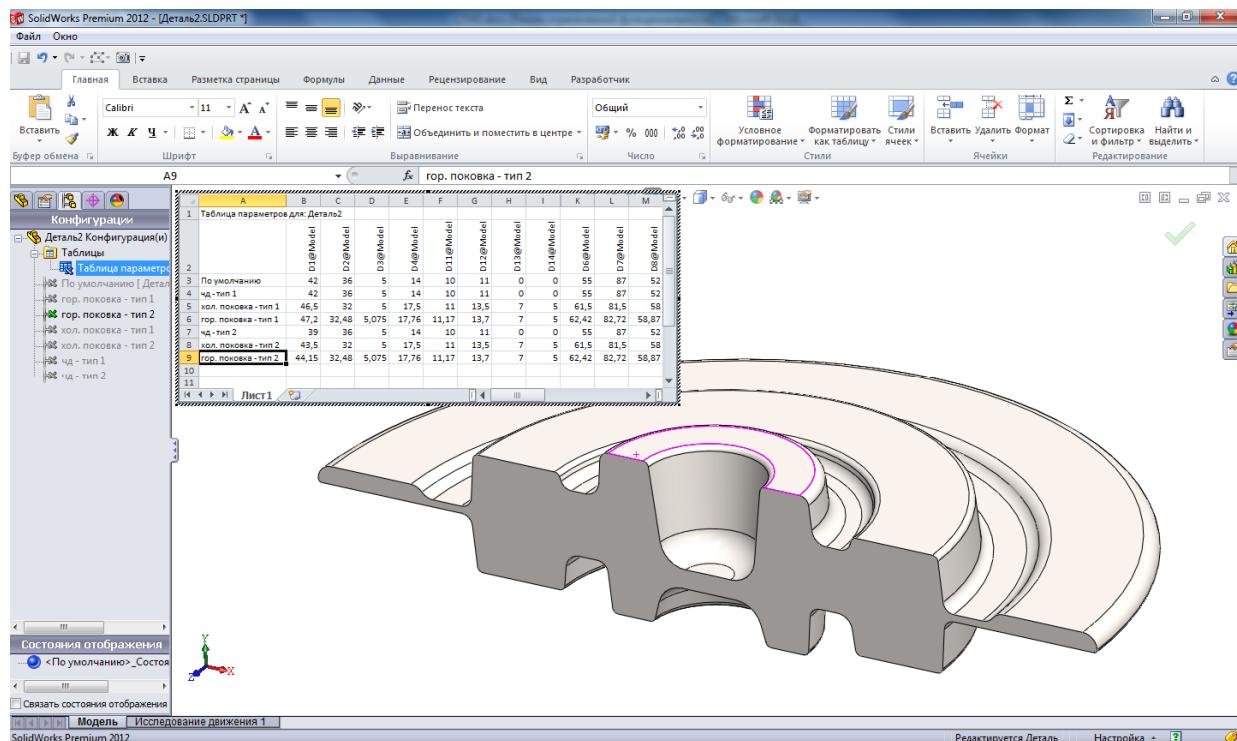


Рис. 2. Переключение конфигураций в SolidWorks

Некоторым недостатком данного подхода является сложность подготовки исходной модели с взаимосвязями между всеми элементами каждой конфигурации.

Подводя итоги, можно отметить, что назначение припусков и допусков – это баланс между экономией материала, стоимостью обработки и обеспечением требуемого качества. Использование таблиц из стандартов, хотя и кажется простым решением, сопряжено с рядом

сложностей. Поэтому для сокращения времени проектирования, повышения точности за счет автоматизации данного процесса, разработан собственный специализированный программный модуль. Он позволяет не только отдельно определить величину припуска и допускаемое отклонение размера, но и за счет встраивания в Excel взаимодействовать с SolidWorks, тем самым быстро рассчитывать новые размеры для разных конфигураций детали.

### **Библиографический список**

1. Галкин В.И. и др. Разработка программного обеспечения для проектирования формы поковок осесимметричных деталей из сталей //Металлы. 2024. № 4. С. 85-93. DOI: 10.31857/S0869573324048593
2. Жаров М.В. Исследование течения металла при изотермической штамповке авиационных панелей и обечайек с целью повышения качества изделий // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103. № 2. С. 120-124. EDN: LIVEIZ
3. Власов А.В. и др. Опыт использования QformDirect для проектирования предварительных переходов при горячей объемной штамповке //Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20. № 11. С. 501-506. EDN: PLFYIM
4. Маркелов Е.Е. и др. К вопросу совершенствования технологии горячей объемной штамповки при изготовлении поковок для деталей ракетно-космической техники // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4 (62). С. 111-117. EDN: ПОНВУ
5. Han Y., Wang M., Chen Y. et al. Automatic preform design and optimization for aeroengine disk forgings. Int J Adv Manuf Technol 125, 1845–1858 (2023). DOI: 10.1007/s00170-022-10627-z

УДК 681.518; ГРНТИ 50.49

## **ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОПУСКОМ НА ПРЕДПРИЯТИИ**

**K.A. Зеленков, Е.В. Тинина**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kostya.zelenkov@gmail.com*

**Аннотация.** В работе рассмотрена система контроля и управления допуском на предприятии, описана работа зоны въезда на территорию автомобиля через шлагбаум и основные функции элементов данной автоматизированной системы ограничения допуска на предприятии. Выбран и описан тип программируемого логического контроллера для обеспечения работы системы и его язык программирования. Приведен алгоритм работы контроллера.

**Ключевые слова:** система контроля и управления, допуск на предприятии, шлагбаум, элементы, автоматизированная система, контроллер, язык программирования, алгоритм.

## **THE ELEMENT BASE OF THE ADMISSION CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEM AT THE ENTERPRISE**

**K.A. Zelenkov, E.V. Tinina**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, kostya.zelenkov@gmail.com*

**The summary.** The paper considers the access control and management system at the enterprise, describes the operation of the entrance zone to the territory of the car through the barrier and the main functions of the elements of this automated access control system at the enterprise. The type of programmable logic controller for system operation and its programming language are selected and described. The algorithm of the controller operation is given.

**Keywords:** control and management system, access to the enterprise, barrier, elements, automated system, controller, programming language, algorithm.

В современном мире предприятия сталкиваются с проблемой обеспечения безопасности и контроля допуска сотрудников и посетителей на территорию объекта, для решения которой используются различные автоматизированные системы ограничения допуска, обеспечивающие высокую степень безопасности, удобство использования и экономию времени и ресурсов [1].

Система контроля и управления допуском (СКУД) на предприятии включает в себя турникетную зону, зону въезда через шлагбаум и офисные двери. Каждая зона организовывается определенным образом, соответствующим способу допуска на территорию.

В работе [2] предлагается одна из возможных схем СКУД для въезда на территорию предприятия автомобиля через шлагбаум. Работа системы состоит в следующем.

Автомобиль с индивидуальным регистрационным номером подъезжает к территории предприятия. Камера видеонаблюдения считывает номер и передаёт информацию на контроллер СКУД, который связан с базой данных, где хранится информация о разрешённых для въезда номерах транспортных средств. Информация с контроллера о номере автомобиля передаётся на шлагбаум. Если номер вписан в базу данных, то перед машиной поднимается шлагбаум, и она въезжает на территорию. Шлагбаум будет поднят до тех пор, пока оптические датчики (фотоэлементы) передают информацию, что автомобиль ещё не проехал, передача осуществляется с незначительной временной задержкой.

В случае, если номер не зарегистрирован в базе данных, или камера не смогла считать его, то шлагбаум не поднимается, и водителю нужно будет воспользоваться запрограммированным радиобрелком, либо с помощью охранника, которой сделает то же самое, предварительно проверив документы владельца автомобиля. В таблице 1 представлены элементы данной СКУД и выполняемые ими функции.

Таблица 1. Функции элементов автоматизированной СКУД на предприятии при проезде через шлагбаум

Элемент системы	Выполняемая функция
Камера видеонаблюдения	Контроль проезда автомобиля через шлагбаум, считывание номера
Контроллер	Приём, обработка и передача информации
Шлагбаум	Допуск на территорию
Оптические датчики	Следение перемещения автомобиля и передача информации для срабатывания шлагбаума
Радиобрелок	«Ручной» подъём шлагбаума

Контроллер (программируемый логический контроллер) является важным элементом автоматизированной системы ограничения допуска. Его работа определяется видом поступающей информации, что, в свою очередь, влияет на среду программирования и применяемые языки программирования [3].

На данный момент широко применяется контроллер ALPHA XL Mitsubishi AL2-24MR-A, использующий среду программирования AL-PCS-WIN, внешний вид которого представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Контроллер ALPHA XL Mitsubishi AL2-24MR-A

Контроллер AL2-24MR-A – это программируемый логический контроллер, предназначенный для использования в системах автоматизации и управления технологическими процессами. Он имеет 24 входа и выхода, которые могут быть расширены до 28, работает от источника питания 24 В постоянного тока и поддерживает языки программирования FBD (Functional Block Diagram) и SFC (Sequential Function Chart). Его средние габариты и вес в

менее 300 г обеспечивают удобство при эксплуатации. Также устройство достаточно точное со временем срабатывания до 10 мс. Данный контроллер может работать в широком диапазоне температур от -25 до +55 °C.

На передней панели контроллера (рисунок 1) располагаются восемь кнопок, с помощью которых вводятся различные данные в память устройства, изменяются позиции в меню, выбираются операции и параметры данных, а также вводятся необходимые величины во время работы. Основные функции кнопок представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные функции кнопок передней панели контроллера

Название кнопок	Функции кнопок
«OK»	Открытие пунктов меню, подтверждение ввода данных и ручного включения/выключения функций монитора
«ESC»	Прекращение операции, перемещение в меню более высокого уровня или в новое меню
«+»	Подключение функциональных блоков, увеличение вводимых значений, устанавливающихся напрямую (DirectSet), и значений таймеров или перемещение по программам или в меню
«-»	Отсоединение функциональных блоков, уменьшение вводимых значений, устанавливающихся напрямую (DirectSet), и значений таймеров или перемещение по программам или в меню
«^»	Перемещение вверх по пунктам меню
«v»	Перемещение вниз по пунктам меню
«>»	Перемещение вправо на LCD-дисплее, в программе функционального блока или по команде перехода
«<»	Перемещение влево на LCD-дисплее, в программе функционального блока или по команде перехода

Внутри контроллера находится микропроцессор, который выполняет операции на основе программы, загруженной в его память. Программа состоит из логических инструкций, написанных пользователем с помощью программного обеспечения. Они, в свою очередь, управляют состоянием входов и выходов контроллера, а также взаимодействием с внешними устройствами через различные интерфейсы. Устройство поддерживает нескольких стандартных протоколах связи, такие как Ethernet и Modbus, имеет модульную структуру для адаптации системы под конкретные задачи.

Данный контроллер обеспечивает высокую производительность и надёжность. На его входы могут приходить цифровые сигналы от камеры видеонаблюдения и аналоговые сигналы от датчиков. К его преимуществам также можно отнести низкое потребление энергии, наличие встроенных функций, упрощающих разработку программ (таймеры, счётчики, аналоговые входы/выходы), и простоту в использовании благодаря интуитивно понятному интерфейсу.

Рассмотрим язык программирования контроллера FBD. Это графический язык программирования, который используется для создания программ для автоматизации процессов. Он напоминает принципиальные схемы электронных устройств и позволяет чётко отображать взаимосвязь входов и выходов программы. В FBD используются стандартные и пользовательские функциональные блоки, а также сигналы разных видов, например, логические или аналоговые. Графические функциональные блоки представляют собой математические функции, логические операции и другие элементы, необходимые для обработки и управления сигналами.

Этот язык нагляден и прост в понимании. При его применении можно добавлять новые функциональные блоки. Так как он обладает достаточной гибкостью, его широко используют для создания сложных систем. Но для проведения тестирования и отладки необходимы дополнительные устройства, а также могут возникать трудности при совмещении с другими языками программирования. В целом данный язык программирования хорошо себя зарекомендовал при разработке управляющих программ для контроллеров.

В данном случае управляющая программа будет выполнять контроль проезда автомобиля на территорию предприятия через шлагбаум: контроллер примет информацию с камеры видеонаблюдения или с радиорелка, отработает её и отправит сигнал разрешения для поднятия шлагбаума. Также контроллер будет принимать и обрабатывать информацию с оптических датчиков, чтобы не допустить случайного срабатывания шлагбаума.

Таким образом, алгоритм работы контроллера AL2-24MR-A на языке FBD включает следующие этапы.

1. Сбор и обработка входных сигналов, когда контроллер получает данные от внешних устройств через входы.

2. Логическая обработка входных сигналов согласно заданным пользователем логическим выражениям и функциям (управляющая программа).

3. Управление выходными устройствами на основе обработанных данных, когда эти устройства активируются или деактивируются через выходы контроллера.

4. Хранение и передача данных: контроллер может сохранить значения переменных или передать данные другим устройствам через дополнительные порты расширения.

Таким образом, контроллер ALPHA XL Mitsubishi AL2-24MR-A с управляющей программой на языке FBD это достаточно оптимальное решение для создания автоматизированной СКУД на предприятии. Анализ его работы показал, что он быстро и надежно обеспечивает проезд автотранспорта, может реагировать на внештатные ситуации и перепрограммироваться при изменении своих функций.

### **Библиографический список**

1. Зеленков, К.А., Тинина, Е.В. Анализ автоматизированных систем ограничения допуска на предприятии / Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024 [текст]: сб. тр. VII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6. / Под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2024. С. 82-86.
2. Зеленков, К.А., Тинина, Е.В. Пути совершенствования систем ограничения доступа на предприятии / Актуальные проблемы современной науки и производства: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань: РГРТУ, 2024. С. 274-283.
3. Жукова, И.Ю., Попов, С.А. Технические средства систем контроля и управление доступом: Курс лекций / И.Ю. Жукова, С.А. Попов. – Москва, 2020. – 105 с.

УДК 004.043; ГРНТИ 20.51.23

## **МЕТОДЫ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ОБЪЁМОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ**

**Д.А. Порнякова, К.Ю. Трушина**

*Ryazan State Radio Engineering University*

*Ryazan, dianaprnkv@yandex.ru*

**Аннотация.** Статья посвящена обзору современных методов анализа больших объемов производственных данных. Рассматриваются ключевые подходы, такие как кластерный анализ, анализ временных рядов, а также методы визуализации больших данных. В статье приводится сравнение методов, а также их применимость к различным задачам, стоящим перед промышленными предприятиями, например, оптимизация процессов и повышение качества продукции.

**Ключевые слова:** методы анализа данных, производственные данные, кластерный анализ, предиктивная аналитика, методы визуализации больших данных.

## **METHODS OF ANALYZING LARGE VOLUMES OF PRODUCTION DATA**

**D.A. Pornayakova, K.Y. Trushina**

*Ryazan State Radio Engineering University*

*Ryazan, dianaprnkv@yandex.ru*

**Abstract.** The article is devoted to an overview of modern methods of analyzing large volumes of production data. Key approaches such as cluster analysis, predictive analytics, and big data visualization techniques are considered. The article analyzes the advantages and disadvantages of each

method, as well as their applicability to various tasks facing industrial enterprises, for example, process optimization and product quality improvement.

*Keywords:* data analysis methods, production data, cluster analysis, predictive analytics, big data visualization methods.

Современные производственные системы генерируют огромные массивы данных с высокой скоростью, которые не могут быть эффективно обработаны традиционными методами. Ручной анализ просто невозможен.

Возникает потребность в применении специализированных методов для анализа больших объемов производственных данных. В больших объемах данных скрыты сложные взаимосвязи и закономерности, которые не видны при поверхностном анализе. Только специальные методы машинного обучения позволяют их обнаружить.

Производственные предприятия генерируют разнообразные данные, которые можно классифицировать по нескольким признакам. К основным источникам относятся датчики, контролирующие параметры оборудования и технологических процессов (температура, давление, вибрация и т.д.), системы управления производством (MES, ERP, SCADA), системы контроля качества, логистические системы, а также данные о персонале и клиентах. Эти данные могут представлять собой числовые значения, категориальные переменные, текстовые описания, временные ряды, пространственные координаты, и обладают различной степенью структурированности – от строго организованных табличных данных до неструктурированных файлов изображений или видео. Разнообразие источников и типов данных требует применения комплексных подходов к сбору, обработке и анализу для извлечения ценной информации и повышения эффективности производства.

Углубленное изучение методов анализа больших данных на производстве открывает возможности для оптимизации процессов, повышения эффективности и снижения рисков. Рассмотрим некоторые методы подробнее в контексте производственной среды.

1. **Кластерный анализ:** на производстве кластерный анализ применяется для группировки схожих объектов, что позволяет выявлять скрытые закономерности и принимать обоснованные решения [1].

Например, кластерный анализ применим для группировки дефектов продукции по схожим признакам для определения корневых причин и улучшения контроля качества (рисунок 1).

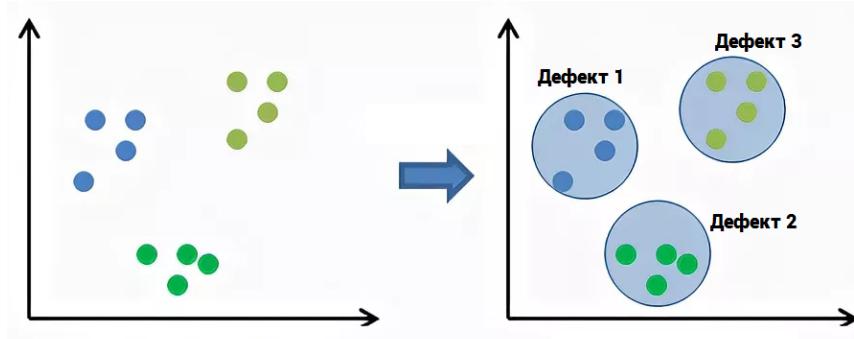


Рис. 1 Кластеризация дефектов по схожим признакам

Алгоритмы, такие как K-means (метод k-средних) или DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise) – алгоритм кластеризации на основе плотности, могут эффективно разделять дефекты на кластеры, указывающие на проблемы в сырье, оборудовании или процессе производства.

Краткий сравнительный анализ [2] методов K-means и DBSCAN приведен в таблице 1:

Таблица 1. Сравнение методов K-means и DBSCAN

Характеристика	K-means	DBSCAN
Тип кластеризации	Центроидная	Плотностная
Необходимость параметра	Да (количество кластеров k )	Да (минимальное количество точек, необходимых для формирования кластера, радиус окрестности вокруг каждой точки)
Форма кластеров	Сферическая	Произвольная
Чувствительность к шуму	Высокая	Низкая
Работа с выбросами	Низкая	Высокая
Скорость работы	Быстрая	Медленнее на больших наборах данных

Ряд случаев, для которых может быть использован кластерный анализ:

- **сегментация клиентов** – разделение клиентов на группы с похожими потребностями и характеристиками;
- **оптимизация логистики** – кластеризация поставщиков или клиентов по географическому положению для оптимизации маршрутов доставки и снижения транспортных расходов;
- **анализ поведения оборудования** – группировка машин по показателям эффективности для выявления "отстающих" и планирования профилактического обслуживания.

2. **Анализ временных рядов:** производственные данные часто представляют собой временные ряды, отражающие изменение параметров во времени (например, производительность оборудования, расход энергии, объем продаж). Методы анализа временных рядов позволяют обеспечить [3]:

- **прогнозирование спроса** – точное прогнозирование спроса на продукцию позволяет оптимизировать запасы, планировать производство и избегать дефицита или перепроизводства;
- **выявление аномалий** – анализ временных рядов помогает обнаружить отклонения от нормального функционирования оборудования или процесса, что позволяет оперативно реагировать на потенциальные проблемы и предотвращать сбои;
- **планирование технического обслуживания** – анализ данных о работе оборудования позволяет прогнозировать вероятность поломок и планировать техническое обслуживание, минимизируя простой.

В зависимости от типа данных в основном применяются три метода для анализа временных рядов:

- ARMA (англ. autoregressive moving-average model) – модель авторегрессии – скользящего среднего;
- ARIMA (англ. autoregressive integrated moving average) – авторегрессионная интегрированная скользящая средняя;
- SARIMA (англ. seasonal auto-regressive integrated moving average) – сезонная интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего.

В таблице приведено сравнение методов прогнозирования:

Таблица 2. Сравнение методов ARMA, ARIMA и SARIMA

Метод	Учет тренда	Учет сезонности	Сложность	Тип анализируемых данных
ARMA	Нет	Нет	Низкая	Стационарные данные
ARIMA	Да	Нет	Средняя	Нестационарные данные
SARIMA	Да	Да	Высокая	Нестационарные с сезонностью

Хотя методы ARMA, ARIMA и SARIMA являются мощными инструментами для анализа временных рядов, их применение требует внимательного подхода к анализу данных,

выбору параметров и интерпретации результатов. Правильное понимание этих аспектов поможет повысить точность прогнозирования и улучшить качество моделей.

3. **Предиктивная аналитика:** нацелена на прогнозирование будущих событий на основе исторических данных. В производственной среде предиктивная аналитика используется для:

- *прогнозирование отказов оборудования* – использование данных о работе оборудования для предсказания вероятности отказов и планирования профилактического ремонта, что снижает время простоя и затраты на ремонт;
- *оптимизация цепочки поставок* – предсказание спроса и колебаний цен на сырье позволяет оптимизировать закупки и снизить риски;
- *управление запасами* – точные прогнозы спроса оптимизируют уровни запасов, минимизируя затраты на хранение и предотвращая дефицит.

4. **Методы визуализации** больших данных: визуализация данных играет ключевую роль в понимании сложных производственных процессов. Эффективная визуализация позволяет:

- *быстрое обнаружение аномалий* – графическое представление данных позволяет быстро заметить отклонения от нормы и оперативно реагировать на них;
- *простое понимание сложных процессов* – визуализация помогает наглядно представить результаты анализа и сделать их доступными для специалистов, не имеющих глубоких знаний в области анализа данных;
- *поддержка принятия решений* – визуальные инструменты облегчают принятие обоснованных решений на основе полученных данных.

В целом, комплексное применение этих методов анализа больших данных на производстве позволяет существенно улучшить эффективность работы, снизить риски и повысить конкурентоспособность предприятия. Однако, важно помнить о необходимости качественных данных, правильного выбора методов и интерпретации результатов.

### Библиографический список

1. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. — 3-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 512 с.
2. Дубровская Л.И., Князев Г. Б. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие. - Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. - 120 с.
3. Анализ временных рядов и прогнозирование: учебник / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 320 с.: ил.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

## МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЁТНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ БПЛА: ОТ ПЛАНИРОВАНИЯ ДО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

К.О. Выставкин, И.Н. Романов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, vistavkin94@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена современным методам формирования полётных заданий для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с акцентом на их прикладное применение в задачах мониторинга инфраструктуры. Рассмотрены ключевые этапы проектирования маршрутов, адаптации к внешним условиям и интеграции специализированного оборудования. На примере системы поиска утечек в трубопроводах с использованием БПЛА, оснащённых тепловизионными камерами, продемонстрированы принципы автоматизации и оптимизации процессов. Отдельное внимание удалено разработке веб-интерфейса для интерактивного создания полётных заданий. Результаты тестирования подтверждают эффективность предложенных решений.

## METHODS OF GENERATING FLIGHT MISSIONS FOR UAVS: FROM PLANNING TO PRACTICAL IMPLEMENTATION

K.O. Vystavkin, I.N. Romanov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, vistavkin94@mail.ru*

*Abstract.* The article focuses on modern methods of generating flight missions for unmanned aerial vehicles (UAVs), emphasizing their applied use in infrastructure monitoring tasks. Key stages of route design, adaptation to external conditions, and integration of specialized equipment are discussed. Using the example of a pipeline leak detection system with UAVs equipped with thermal imaging cameras, the principles of automation and process optimization are demonstrated. Special attention is given to the development of a web interface for interactive mission planning. Testing results confirm the effectiveness of the proposed solutions.

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали неотъемлемой частью промышленности, сельского хозяйства и экологического мониторинга [1-3]. Их способность работать в труднодоступных зонах, сочетающаяся с высокой мобильностью и точностью, делает их незаменимыми для задач, требующих оперативного реагирования. Одной из таких задач является обнаружение утечек в трубопроводах, где традиционные методы инспекции — такие как наземные проверки или использование пилотируемых летательных средств — оказываются дорогостоящими, медленными и потенциально опасными для персонала.

Тепловизионные камеры, установленные на БПЛА, позволяют выявлять температурные аномалии, вызванные утечками жидкостей или газов. Однако успех таких миссий напрямую зависит от корректности формирования полётных заданий, которые должны учитывать не только географические особенности местности, но и технические параметры оборудования, погодные условия, а также возможность адаптации к изменениям среды в реальном времени.

Цель данной статьи — систематизировать методы формирования полётных заданий, продемонстрировать их применение на примере поиска утечек и предложить решения для автоматизации процесса с помощью веб-интерфейса.

### Основные принципы формирования полётных заданий

Полётное задание для БПЛА представляет собой набор инструкций, определяющих маршрут, высоту, скорость, зоны сканирования и действия в нештатных ситуациях. Ключевые аспекты проектирования включают:

**Определение целей миссии.** Перед формированием задания необходимо чётко определить цели:

**Тип задачи:** мониторинг, доставка грузов, аварийный поиск.

**Требования к данным:** разрешение снимков, частота кадров, перекрытие зон сканирования.

**Ограничения:** время полёта, вес полезной нагрузки, законодательные нормы (например, запретные зоны).

Например, для поиска утечек в газопроводе критически важны:

Высокое разрешение тепловизионной камеры (не менее  $640 \times 512$  пикселей).

Перекрытие снимков не менее 15% для исключения пропусков аномалий.

Учёт ветра, который может смещать БПЛА и искажать данные.

#### 1. Расчёт параметров полёта

**Высота:** влияет на ширину зоны покрытия и детализацию данных. Например, при высоте 30 м и угле обзора камеры  $45^\circ$  ширина полосы сканирования ( $S$ ) рассчитывается по формуле  $S=2H \cdot \tan(2\theta)$ , где  $H$  — высота,  $\theta$  — угол обзора. Для  $H=30$  м и  $\theta=45^\circ$ ,  $S \approx 25$  м.

**Скорость:** должна соответствовать частоте съёмки камеры. Например, при скорости 8 м/с и интервале между снимками 2 сек, расстояние между кадрами составит 16 м. Для перекрытия 20% ширина полосы должна быть не менее 20 м.

**Энергопотребление:** время полёта зависит от ёмкости батареи, веса БПЛА и нагрузки. Типичные значения — 25–40 минут для коммерческих дронов.

## 2. Динамическая адаптация

Полётные задания должны предусматривать возможность корректировки в реальном времени. Например:

Изменение маршрута при обнаружении препятствий (деревья, ЛЭП).

Автоматический переход в режим детального сканирования при выявлении аномалий.

Коррекция курса при сильном ветре с использованием данных GPS и IMU-датчиков напрямую зависит от корректности формирования полётных заданий, которые должны учитывать не только географические особенности местности, но и технические параметры оборудования, погодные условия, а также возможность адаптации к изменениям среды в реальном времени.

## Планирование маршрутов для специализированных задач

### Поиск утечек в трубопроводах

Тепловизионные камеры фиксируют перепады температур, вызванные утечками. Для эффективного сканирования применяются следующие стратегии:

#### 1. Предварительная подготовка

**Интеграция картографических данных:** импорт карт трубопроводов из GIS-систем (например, ArcGIS) для точного позиционирования.

**Калибровка оборудования:** настройка тепловизора на определение температурного порога утечки (например, +5°C выше фоновой температуры).

#### 2. Алгоритмы построения маршрута

**Змейковый паттерн (Boustrophedon):** обеспечивает полное покрытие зоны параллельными проходами. Подходит для линейных объектов, таких как трубопроводы.

**Адаптивная сетка:** автоматически регулирует расстояние между линиями сканирования в зависимости от ширины полосы (SS) и требуемого перекрытия.

**Точки интереса (POI):** фокусировка на участках с высоким риском коррозии или механических повреждений.

#### 3. Обработка данных в реальном времени

**Выделение аномалий:** программное обеспечение анализирует тепловые снимки, выделяя области с температурой выше заданного порога.

**Кластеризация:** группировка пикселей в зоны потенциальных утечек для уменьшения количества ложных срабатываний.

**Генерация отчётов:** автоматическое создание карт с координатами аномалий и их температурными характеристиками.

## Разработка веб-интерфейса для автоматизации планирования

Для упрощения создания полётных заданий разработан веб-интерфейс, объединяющий инструменты визуализации, расчёта параметров и экспорта данных.

### Функциональные модули

#### 1. Интерактивная карта

**Основа:** библиотека Leaflet.js с подложкой OpenStreetMap или спутниковыми снимками.

**Инструменты:**

- Рисование маршрутов, зон избегания и POI.

- Импорт данных из форматов KML, GPX.
- 3D-просмотр рельефа для учёта высотных перепадов.

## 2. Панель параметров

Настройка высоты, скорости, перекрытия снимков.

Выбор типа сенсора (тепловизор, LiDAR, RGB-камера).

Расчёт времени полёта и расхода батареи на основе введённых данных.

## 3. Оптимизация маршрута

- Алгоритмы:

- A\*: для поиска кратчайшего пути между точками.
- Генетические алгоритмы: для глобальной оптимизации сложных маршрутов.

- Учёт внешних факторов:

- Интеграция прогноза ветра через API (например, OpenWeatherMap).
- Коррекция маршрута при обнаружении препятствий в реальном времени.

## 4. Экспорт заданий

Поддержка форматов: DJI Waypoints, MAVLink, CSV, Json.

Генерация файлов с метаданными: дата, оператор, ID миссии.

### Заключение и перспективы

Разработанные методы формирования полётных заданий позволяют значительно повысить эффективность БПЛА в задачах мониторинга инфраструктуры. Интеграция тепловизионных камер, адаптивных алгоритмов и веб-интерфейса обеспечивает точность, скорость и удобство работы.

#### Перспективные направления:

1. Искусственный интеллект: Использование нейросетей для прогнозирования аномалий на основе исторических данных.
2. Рой БПЛА: Координация групп дронов для масштабных инспекций.
3. Расширенная аналитика: Автоматическая оценка степени риска утечек и формирование рекомендаций по ремонту.

Внедрение подобных систем способно сократить затраты на обслуживание инфраструктуры и минимизировать экологические риски.

### Библиографический список

1. Жуков, М.А. Аналитические системы на БПЛА для изучения окружающей среды / М.А. Жуков. – Москва : Экология и наука, 2022. – 192 с.
2. Филимонов, А.Б. Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования больших протяженных территорий / А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов, К.Ф. Каф. – Москва : Мос, 2020. – 270 с.
3. Кириллов, И.Ф. БПЛА: технологии, применение, перспективы / И.Ф. Кириллов. – Санкт-Петербург : Техника, 2018. – 302 с.

УДК 621.74 ГРНТИ 55.15.01

## ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАССИВНЫХ КОРРЕКТОРОВ ПОЛОЖЕНИЯ ДУГИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Е.М. Кузьмина, В.А. Лашин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, katushka\_1959@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются принципы построения пассивных корректирующих устройств, использование которых позволило бы изменять траекторию горения дуги в электродуговых сталеплавильных печах постоянного тока.

## POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF USING PASSIVE ARC POSITION CORRECTORS IN DC ELECTRIC ARC FURNACES

E.M. Kuzmina, V.A. Lashin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, katushka\_1959@mail.ru

*Annotation.* The paper discusses the principles of constructing passive corrective devices, the use of which would allow changing the trajectory of arc combustion in DC electric arc steelmaking furnaces..

*От авторов.* Сторонники дуговых печей постоянного тока (ДППТ) говорят почти всегда об их достоинствах, тогда как приверженцы печей с дугой переменного тока (ДСП) не упускают случая отметить их недостатки. Каждый из них по-своему прав, хотя если оба типа печей существуют одновременно, значит, есть для этого объективная причина. Мы не испытываем желания участвовать в этом противостоянии. Более интересным и важным для нас является то, что если видишь какой-то недостаток, постараися помочь от него избавиться, а потом уже пусть время решает, какой тип печей и для каких задач найдет себе применение в будущем. Одним из главных недостатков ДППТ является отклонение дуги постоянного тока в магнитном поле печи.

*Явления, сопровождающие отклонение дуги.* Согласно определению действующей на дугу силы, при наметившемся отклонении дуги поворачивается расположение пальцев руки в направлении протекающего тока, и как следствие этого появляется вертикальная составляющая силы  $F_B$  на рисунке 1, а. Эта составляющая будет расти по мере увеличения отклонения дуги. Видимо поэтому область разрушения теплозащиты на стенке печи располагается выше уровня расплавленного металла, как это показано на рисунке 1, б [2].

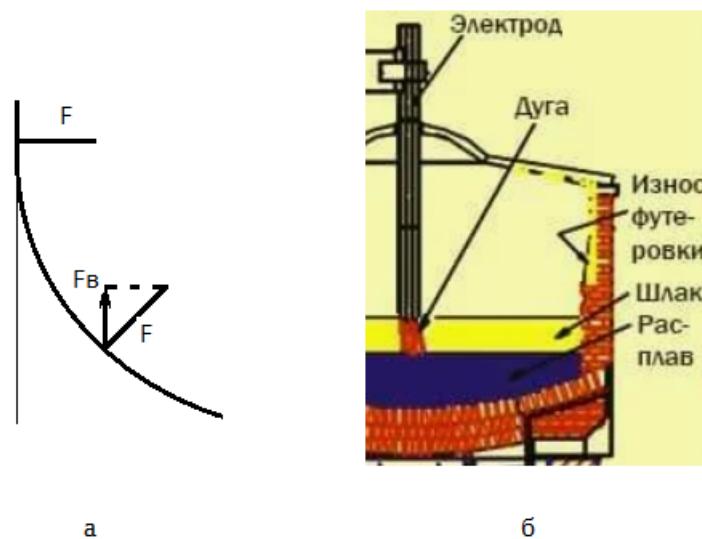


Рис. 1. Распределение отклоняющих дугу сил (а) и место износа футеровки (б)

Только что сказанное может оказаться необходимым при выборе интенсивности корректирующего воздействия на дугу. В одном случае может потребоваться лишь частичная компенсация отклонения, предотвращающая разрушение теплозащиты стенки. В другом может оказаться целесообразной некоторая перекомпенсация вплоть до инвертирования знака  $F_B$  путем увеличения отклонения дуги влево от вертикали.

*Конструктивные способы уменьшения отклонения дуги.* При выборе способа формирования корректирующего воздействия часто пытались обозначить причину, вызывающую отклонение дуги, и место ее проявления. Поскольку каждый из авторов делал это по собст-

венным представлениям о происходящем, в этом процессе было допущено много ошибок и заблуждений. На самом деле большинство причин отклонения дуги (по крайней мере, наиболее значимые из них) уже известны и точно могут быть установлены по изменению конструктивных оформления печей типа ДППТ.

Например, мешающее влияние магнитных потоков, замыкающихся через магнитопроводящие конструкции пола в печах ДППТ выкатного типа (рисунок 2) создает с правой стороны ничем не скомпенсированное слева усилие в направлении стрелки  $F$ . В современных конструкциях этот недостаток устраняется установкой плавильной ванны на симметричную платформу, вместе с которой она наклоняется для слива металла и шихты без нарушения сбалансированности магнитной системы.

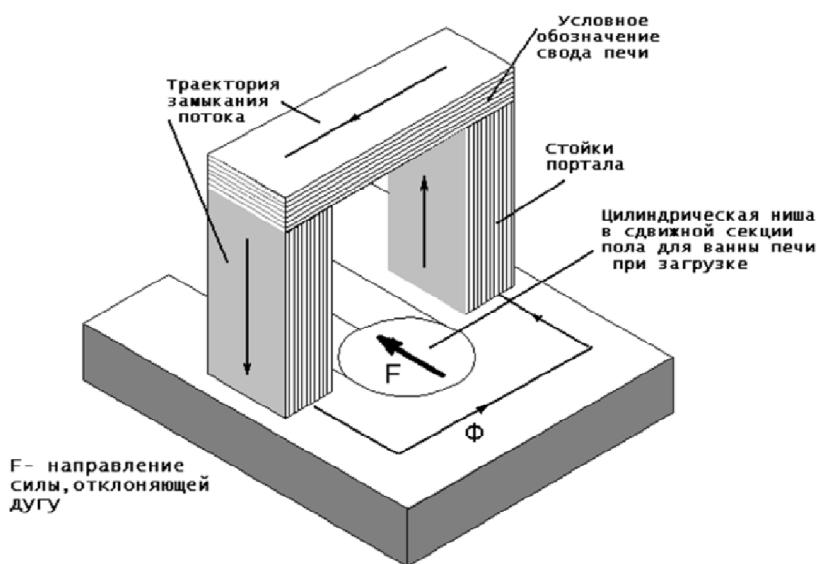


Рис. 2. Замыкание потоков рассеяния через портал

Для загрузки печи доступ к ее внутреннему пространству обеспечивается отводом в сторону свода печи на поворотной кулисе. Подобным образом уменьшается дестабилизирующее воздействие питающей токовой петли за счет верхнего подвода питания.

Описанный способ симметрирования магнитной системы печи хорошо согласуется с известным в автоматике управлением методом компенсации возмущений, только он выполняется конструктивными средствами.

Казалось бы, все хорошо, компенсированы все известные возмущения и можно спокойно работать. Однако, если появляется новое отклоняющее воздействие, система снова становится беззащитной перед ним. И как быть с теми печами, конструктив которых не приспособлен к подавлению влияния возмущающих помех?

*О принципе работы пассивных корректоров.* При всем многообразии литературы об «управлении» дугой следует признать, что этот вопрос остался так и не решенным. Поэтому основной целью этой и ряда других работ является выяснение того, что конкретно надо сделать, чтобы изменить траекторию горения дуги.

Есть много оснований утверждать, что причин отклонения дуги внутри печи нет и быть не может. Поэтому все попытки создать корректирующие воздействия внутри печи ни к чему не привели.

В [1] было предложено искать источник магнитной асимметрии на внешнем стальном ободе печи. Там же была обоснована целесообразность ввода коррекции по равнодействующей всех участков сил. Тот факт, что дуга постоянного тока отклоняется из-за несбалансированности магнитного поля, не исключает возможности симметрировать поле

применением пассивных устройств. В данной статье рассматриваются только пассивные корректоры.

Принцип их действия простой. На окончных точках диаметра отклонения дуги действуют навстречу друг другу две силы:  $P_1=B_1 \cdot I \cdot 1 \cdot \sin \alpha$  и  $P_2=B_2 \cdot I \cdot 1 \cdot \sin \alpha$ . Если дуга отклоняется вправо, это означает, что индукция на левом окончании диаметра больше, чем на правом. Устранить дисбаланс можно путем выравнивания индукции. Пассивным устройством индукцию можно только уменьшить, поэтому они должны устанавливаться на противоположной от места нарушения футеровки стенке.

В [3] промоделирован вариант корректора, работающего на полном магнитном потоке. В данной работе модель адаптирована на вычисление параметров с частью потока, отводимой из зоны действия на дугу.

*О построении модели.* При составлении модели необходимо стремиться к максимально возможной ее простоте. Желание учесть все, даже малозначащие признаки объекта, приведут к трудно разрешимой задаче. Например, если кривую намагничивания стального корпуса печи представить гиперболическим тангенсом, то выигрыша в точности расчетов это не принесет, трудоемкость математического описания вырастет многократно. Если учесть, что корпус печи находится в состоянии глубочайшего насыщения и не выходит из него даже при погасании дуги, то насыщенный участок можно представить прямой с магнитной проницаемостью насыщения. В этом случае магнитопровод можно считать источником магнитного потока насыщения, т.е. достаточно стабильного дозатора потока.

В разветвленной части магнитной цепи этот поток распределяется по параллельным ветвям в долях, обратно пропорциональных сопротивлениям ветвей. Полученная структура из последовательно соединенных неразветвленного и разветвленного участков заданием параметров адаптируется к характеристикам объекта.

За счет привлечения физических представлений о режиме работы требуемое математическое описание модели значительно упростилось, а нахождение интересующих величин свелось к расчету по несложным формулам. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

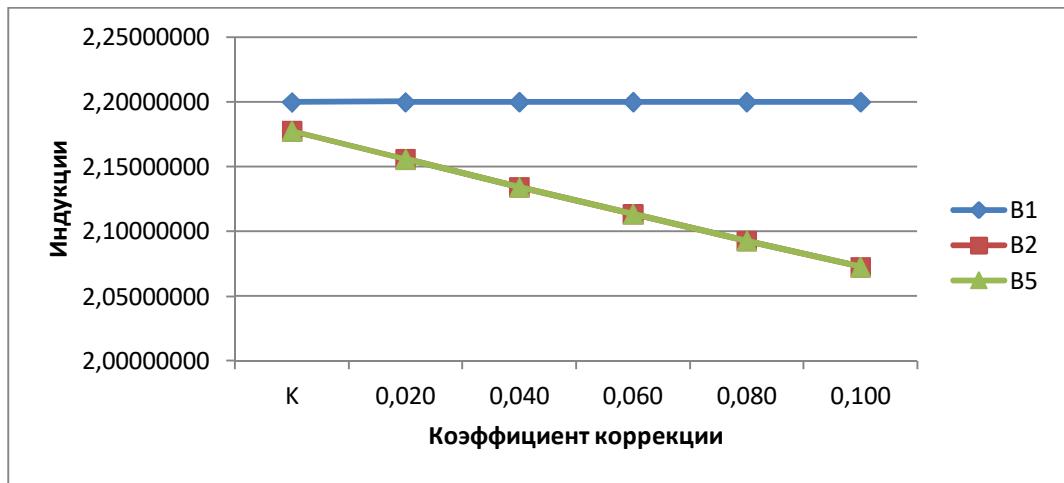


Рис. 3. Результаты моделирования

По сравнению с корректором, работающим с полным потоком [3] ожидалось некоторое повышение эффективности работы корректора при отводе части потока из зоны действия на дугу. Однако результаты моделирования (рисунок 3) не показали никакого выигрыша в эффективности (B2 и B5 слились), но подтвердили перспективность обоих вариантов в каче-

стве основы для симметрирования магнитной системы печи в условиях действия мешающих воздействий любого вида.

Несмотря на кажущуюся идентичность обоих вариантов следует отметить одну особенность. Она проявляется при включении электромагнитов для плавного регулирования управляющих воздействий. Установлено, что существует ряд условий, при одновременном выполнении которых электромагнит может выполнить роль отклоняющей системы. Но при невыполнении хотя бы одного из этих условий включение электромагнита в состав объекта только ухудшит его работу. В этом отношении второй рассмотренный вариант корректора свободно допускает совместное использование с электромагнитом, а первый – нет.

## **Библиографический список**



УДК 64.011.56; ГРНТИ 20.15.15

## **МОДУЛЬ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ РДМ СИСТЕМЫ**

Н.А. Бусаров, Н.В. Грибов, О.В. Миловзоров

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, busarov.nikitos@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе рассмотрен модуль диспетчеризации производства для PDM системы, который позволит контролировать количество станков и прочего оборудования, которое используется в данный момент, чтобы не было простаивания. Данный модуль сможет по-высить эффективность производства за счет контроль за простояванием оборудования, а также предприятию не нужно будет использовать подобные системы, которые имеют более глобальные возможности и большую стоимость, что не всегда полезно, особенно для небольших предприятий или цехов со станками.

**Ключевые слова:** модуль диспетчеризации производства, оборудование, эффективность производства, простаивание оборудования.

## PRODUCTION DISPATCH MODULE FOR PDM SYSTEM

N.A. Busarov, N.V. Gribov, O.V. Milovzorov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia. Ryazan, busgrov.nikitos@gmail.com

*The summary.* This paper discusses a production dispatch module for a PDM system, which will allow you to control the number of machines and other equipment that is currently in use so that there is no downtime. This module will be able to increase production efficiency by monitoring equipment idleness, and the company will not need to use similar systems that have capabilities that are more global and greater cost, which is not always useful, especially for small enterprises or workshops with machine tools.

**Keywords:** production dispatch module, equipment, production efficiency, equipment downtime.

В настоящее время эффективность и оптимизация производственных процессов играют ключевую роль в успешной деятельности предприятий. Любая технология пишется под оборудование, то есть одну и ту же деталь можно изготовить по разным технологическим процессам на разном оборудовании. Этому способствует применение станков с ЧПУ.

Оборудование не должно простоять и должно быть всегда в работе. Разработка и утверждение технологических процессов и документации на них требует определенного времени. Чтобы исключить простои оборудования, необходимо проектировать технологические процессы таким образом, чтобы оборудование было зарезервировано на момент его готовности. Помимо наличия оборудования важное значение имеет наличие станочной технологической оснастки, режущих и измерительных инструментов, которые тоже должны быть свободны для использования совместно с оборудованием.

В соответствии с принципами производственной логистики каждое производственное действие должно иметь четкое время выполнения: время на разработку изделия, на разработку технологического процесса, на выполнение той или иной технологической операции. Как правило, на предприятиях эти нормы имеют строго определенные значения, определяемые общероссийскими классификаторами и стандартами предприятия. Чтобы обеспечить наименьшее время изготовления изделия, необходимо к моменту готовности всей документации иметь в наличии свободное оборудование, технологическую оснастку и измерительный инструмент. При этом процесс изготовления одной и той же детали может быть реализован по разным технологическим маршрутам. В качестве примера приведем 3 технологии выполнения квадратного отверстия в детали:

1 вариант: Сверлильная - Долбёжная - Проволочно-электроэррозионная.

Для выполнения данной технологии необходимы сверлильный станок (для выполнения круглого отверстия), долбёжный станок (для грубой обработки квадрата), проволочно-электроэррозионный станок (для чистовой обработки квадратного отверстия).

2 вариант: Сверлильная - Проволочно-электроэррозионная.

В этом варианте техпроцесса будут задействованы следующее оборудование: сверлильный станок (для выполнения круглого отверстия), проволочно-электроэррозионный станок (для обработки квадратного отверстия).

3 вариант: Сверлильная - Протяжная.

Для выполнения данной технологии нужны сверлильный станок (для выполнения круглого отверстия), протяжный станок (для выполнения квадрата с помощью квадратной протяжки).

Таким образом, три варианта технологического маршрута представляют возможность выбора свободного оборудования и технологической оснастки. Проанализировав, какими способами можно выполнить данное отверстие, технолог по базе данных может посмотреть, какое оборудование и технологическая оснастка свободны и в течение какого времени. Это дает возможность зарезервировать все необходимое для разработки и утверждения технологического процесса по наиболее подходящему варианту маршрута.

Модуль диспетчеризации производства для PDM системы представляет собой интегрированную базу данных, учитывающую свободное оборудование различных групп и типов, а также технологическую оснастку и измерительный инструмент, которые можно зарезервировать с помощью встроенных в базу данных функций, и время, когда все данное оснащение свободно. Это позволяет рационально распределять временные ресурсы и оптимизировать производственные процессы благодаря полной загрузке всего оборудования и ликвидации его простоев. Данный модуль будет способствовать повышению производственной эффективности в рамках производственной логистики. В данной статье будут рассмотрены ключевые аспекты функционирования и преимущества использования модуля диспетчеризации производства для PDM системы, а также важность его применения для повышения конкурентоспособности и эффективности производственных процессов.

В качестве системы управления базами данных для создания рассматриваемого модуля можно выбрать PostgreSQL. Таким образом, модуль диспетчеризации производства для PDM системы будет иметь следующую структуру запросов:

- Запросы на создание таблиц:

Запрос на создание таблицы «Оборудование»:

CREATE TABLE "Оборудование" (

"id" SERIAL PRIMARY KEY,  
 "Название" VARCHAR(100) NOT NULL UNIQUE);

Запрос на создание таблицы «ТехнологическаяОснастка»:

CREATE TABLE "ТехнологическаяОснастка" (  
 "id" SERIAL PRIMARY KEY,

    "Название" VARCHAR(100) NOT NULL UNIQUE);

Запрос на создание таблицы «ИзмерительныйИнструмент»:

CREATE TABLE "ИзмерительныйИнструмент" (  
 "id" SERIAL PRIMARY KEY,

    "Название" VARCHAR(100) NOT NULL UNIQUE);

Запрос на создание таблицы «Сотрудники»:

CREATE TABLE "Сотрудники" (  
 "id" SERIAL PRIMARY KEY,

    "Фамилия" VARCHAR(50) NOT NULL,

    "Должность" VARCHAR(50) NOT NULL);

Запрос на создание таблицы «Заявки»:

CREATE TABLE "Заявки" (  
 "id" SERIAL PRIMARY KEY,

    "Сотрудник\_id" INT NOT NULL REFERENCES "Сотрудники"("id"),

    "Оборудование\_id" INT REFERENCES "Оборудование"("id"),

    "Оснастка\_id" INT REFERENCES "ТехнологическаяОснастка"("id"),

    "Инструмент\_id" INT REFERENCES "ИзмерительныйИнструмент"("id"),

    "Дата\_начала" DATE NOT NULL,

    "Дата\_окончания" DATE NOT NULL,

    CONSTRAINT chk\_dates CHECK ("Дата\_начала" <= "Дата\_окончания"));

Запрос на создание представления «ПросмотрЗаявок»:

CREATE VIEW "ПросмотрЗаявок" AS

SELECT

    z."id" AS "Номер заявки",

    s."Фамилия" AS "Сотрудник",

    o."Название" AS "Оборудование",

    t."Название" AS "Оснастка",

    i."Название" AS "Инструмент",

    z."Дата\_начала",

    z."Дата\_окончания"

FROM

    "Заявки" z

JOIN "Сотрудники" s ON z."Сотрудник\_id" = s."id"

LEFT JOIN "Оборудование" o ON z."Оборудование\_id" = o."id"

LEFT JOIN "ТехнологическаяОснастка" t ON z."Оснастка\_id" = t."id"

LEFT JOIN "ИзмерительныйИнструмент" i ON z."Инструмент\_id" = i."id";

Следующие запросы выдают роли и права доступа с логинами для сотрудников, соответственно право доступа к таблице "Сотрудники" будет иметь только главный технолог:

CREATE ROLE "Главный\_технолог" WITH LOGIN PASSWORD 'MainTech123';

CREATE ROLE "Технолог" WITH LOGIN PASSWORD 'TechUser123';

REVOKE ALL ON ALL TABLES IN SCHEMA public FROM PUBLIC;

GRANT SELECT, INSERT, UPDATE, DELETE ON

    "Оборудование",

    "ТехнологическаяОснастка",

    "ИзмерительныйИнструмент",

    "Сотрудники",

    "Заявки"

TO "Главный\_технолог";

```
GRANT SELECT, INSERT, UPDATE ON
```

```
    "Оборудование",  
    "ТехнологическаяОснастка",  
    "ИзмерительныйИнструмент",  
    "Заявки"
```

```
TO "Технолог";
```

```
REVOKE ALL ON "Сотрудники" FROM "Технолог";
```

```
GRANT SELECT ON "ПросмотрЗаявок" TO "Технолог";
```

```
GRANT USAGE, SELECT ON ALL SEQUENCES IN SCHEMA public TO "Главный_технолог";
```

```
GRANT USAGE, SELECT ON ALL SEQUENCES IN SCHEMA public TO "Технолог";
```

При подключении к базе данных psql –U Технолог –d PDM\_modul и введении логина соответствующий пользователь в зависимости от прав доступа, если является технологом, то при выполнении запроса с таблицей «Сотрудники» будет получать ошибку.

Следующие запросы добавляют данные в таблицы:

```
INSERT INTO "Оборудование" ("Название") VALUES  
(Сверлильный станок),
```

```
(Долбежный станок),
```

```
(Электроэррозионный станок);
```

```
INSERT INTO "ТехнологическаяОснастка" ("Название") VALUES  
(Прошивки),
```

```
(Протяжки),
```

```
(Сверла),
```

```
(Резцы),
```

```
(Зажимные приспособления);
```

```
INSERT INTO "ИзмерительныйИнструмент" ("Название") VALUES  
(Штангенциркуль),
```

```
(Микрометр);
```

```
INSERT INTO "Сотрудники" ("Фамилия", "Должность") VALUES  
(Иванов', 'Главный технолог'),
```

```
(Петров', 'Технолог 1 категории'),
```

```
(Сидоров', 'Технолог 2 категории');
```

Запрос на создание заявки на свободное оборудование, оснастку и измерительный инструмент будет иметь следующую структуру:

```
WITH check_availability AS (
```

```
    SELECT
```

```
        NOT EXISTS (
```

```
            SELECT 1 FROM "Заявки"
```

```
            WHERE "Оборудование_id" = 3
```

```
            AND ("Дата_начала", "Дата_окончания") OVERLAPS ('2024-07-01', '2024-07-
```

```
05')
```

```
) AS equipment_available,
```

```
    NOT EXISTS (
```

```
        SELECT 1 FROM "Заявки"
```

```
        WHERE "Оснастка_id" = 5
```

```
        AND ("Дата_начала", "Дата_окончания") OVERLAPS ('2024-07-01', '2024-07-
```

```
05')
```

```
) AS tooling_available)
```

```
INSERT INTO "Заявки" (
```

```
    "Сотрудник_id",
```

```
    "Оборудование_id",
```

```
    "Оснастка_id",
```

```

"Инструмент_id",
"Дата_начала",
"Дата_окончания")
SELECT
1, -- ID сотрудника
3, -- ID оборудования
5, -- ID оснастки
1, -- ID инструмента
'2024-07-01',
'2024-07-05'
FROM check_availability
WHERE equipment_available AND tooling_available;

```

Технолог создает заявку, то есть заполняет интересующие его оборудование и оснастку в таблицу «Заявки» с помощью запроса. Запрос проверяет занятость оборудования «equipment\_available» и оснастки «tooling\_available». Заявка создается только при условии, что оба оснащения свободны.

Запрос `SELECT * FROM "..."` наглядно демонстрирует результаты запросов, а также представление заявки.

### **Библиографический список**

1. Документация PostgreSQL [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://postgrespro.ru/docs>
2. Козлов, Д.И. Производственная логистика: принципы, методы, технологии: учебное пособие / Д.И. Козлов. Москва: Инфа-М. 2020. - 345 с.

УДК 519.233.32; ГРНТИ 50.01.73

## **РАЗРАБОТКА CRM-СИСТЕМЫ НА БАЗЕ QUINTADB ДЛЯ МАЛОГО И СРЕДНЕГО БИЗНЕСА**

**А.Д. Хуснутдинова, А.А. Рыбкина**

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
РФ, Рязань, alexandra.gerlinskaya@yandex.ru*

**Аннотация.** В данной статье рассматривается процесс разработки CRM-системы на платформе QuintaDB, подходящей для малого и среднего бизнеса. Проанализируем, что такое CRM-системы, их важность для бизнеса, особенности платформы QuintaDB, ее преимущества и основные этапы разработки. Особое внимание уделим автоматизации бизнес-процессов и тому, как это может повысить эффективность работы компаний. Также будут рассмотрены примеры успешных внедрений и рекомендации по оптимизации работы с CRM.

**Ключевые слова:** CRM-системе, QuintaDB, автоматизация, бизнес.

## **DEVELOPMENT OF A CRM SYSTEM BASED ON QUINTADB FOR SMALL AND MEDIUM-SIZED BUSINESSES**

**A.D. Khusnutdinova, A.A. Rybkina,**

*Ryazan State Radio Engineering University*

*Russian Federation, Ryazan, alexandra.gerlinskaya@yandex.ru*

**Abstract.** This article discusses the process of developing a CRM system on the QuintaDB platform, suitable for small and medium-sized businesses. We will analyze what CRM systems are, their importance for business, the features of the QuintaDB platform, its advantages, and the main stages of development. Special attention will be given to the automation of business processes and how this can enhance the efficiency of companies. Successful implementation examples and recommendations for optimizing CRM usage will also be discussed.

**Keywords:** CRM system, QuintaDB, automation, business.

Современный бизнес функционирует в условиях высокой конкурентной среды и постоянных изменений на рынке, что обуславливает необходимость для компаний не только демонстрировать гибкость, но и обладать способностью к оперативной адаптации к новым условиям. В этих условиях управление взаимоотношениями с клиентами (CRM) представляет собой критически важный компонент успешной бизнес-стратегии. CRM-системы не только организуют и хранят информацию о клиентах, но и способствуют формированию долгосрочных отношений с ними, что, в свою очередь, ведет к увеличению объемов продаж и повышению уровня удовлетворенности клиентов.

С каждым годом требования клиентов становятся все более высокими, а их ожидания продолжают расти. Клиенты стремятся к получению персонализированного обслуживания, оперативным ответам на запросы и качественной поддержке. CRM-системы предоставляют необходимые инструменты для решения этих задач, позволяя компаниям эффективно управлять взаимодействиями на всех этапах — от первого контакта до завершения сделки и последующего обслуживания.

В данной статье будет подробно рассмотрен процесс разработки CRM-системы на платформе QuintaDB, которая является оптимальным решением для малого и среднего бизнеса. Платформа предлагает интуитивно понятный интерфейс и высокую степень гибкости, что позволяет пользователям без глубоких знаний в области программирования разрабатывать индивидуальные решения. В рамках исследования будут проанализированы ключевые этапы разработки, включая определение требований, проектирование структуры базы данных, настройку пользовательского интерфейса и автоматизацию бизнес-процессов. Также будут приведены примеры успешного внедрения CRM-систем и рекомендации по оптимизации их функционирования, что позволит компаниям максимально эффективно использовать данные инструменты для достижения своих бизнес-целей. Кроме того, будет обсуждено влияние актуальных трендов в области CRM-технологий на будущее управления клиентскими отношениями.

### Что такое CRM-системы?

CRM (Customer Relationship Management) — это система управления взаимоотношениями с клиентами, которая позволяет компаниям эффективно управлять взаимодействиями с клиентами и потенциальными клиентами. Основные функции CRM-систем включают:

1. Хранение информации о клиентах: Централизованное хранение данных о клиентах, включая контактную информацию, историю покупок и предпочтения, что способствует более персонализированному обслуживанию.
2. Управление продажами: Возможность отслеживания сделок на всех этапах, включая управление воронкой продаж и прогнозирование доходов.
3. Автоматизация маркетинга: Настройка маркетинговых кампаний и сегментация клиентов для повышения эффективности целевых предложений.
4. Поддержка клиентов: Ведение истории обращений и управление запросами, что позволяет оперативно решать проблемы клиентов и повышать их удовлетворенность.
5. Аналитика и отчеты: Инструменты для анализа данных о клиентах и продажах, позволяющие выявлять тренды и оценивать эффективность стратегий.
6. Интеграция с другими системами: Возможность взаимодействия с различными инструментами, такими как почтовые сервисы и ERP-системы, что обеспечивает согласованность бизнес-процессов.
7. Мобильный доступ: Поддержка мобильных приложений для доступа к информации о клиентах и управления задачами в любое время.

Применение CRM-систем способствует повышению уровня обслуживания, улучшению клиентского опыта и увеличению объемов продаж, а также улучшает внутреннюю коммуникацию в командах через доступ к актуальной информации [1].

## QuintaDB как платформа для разработки CRM

QuintaDB представляет собой облачный конструктор баз данных, предназначенный для малых и средних предприятий, позволяющий создавать индивидуальные CRM-системы без необходимости глубоких технических знаний. Платформа сочетает в себе простоту использования и мощные функциональные возможности, что делает её оптимальным решением для автоматизации взаимодействия с клиентами, управления процессами продаж и анализа данных. Ключевым преимуществом QuintaDB является её гибкость: даже без программирования пользователи могут адаптировать систему под уникальные требования бизнеса, включая такие сферы, как розничная торговля, услуги и образование.

Одной из основных характеристик QuintaDB является интуитивно понятный интерфейс с функцией drag-and-drop. Данная функция позволяет пользователям проектировать формы для сбора информации, таблицы для хранения данных и дашборды для визуализации ключевых метрик. Например, возможно создание формы регистрации клиентов с полями «Имя», «Телефон» и «Источник заявки», при этом автоматически генерируется уникальный идентификатор для каждого контакта. Кроме того, платформа поддерживает построение связанных таблиц, таких как «Клиенты», «Сделки» и «Задачи», с установлением связей «один ко многим» или «многие ко многим». Это обеспечивает возможность отслеживания полного цикла взаимодействия с клиентом, начиная с первого обращения и заканчивая завершением сделки.

Для упрощения процесса внедрения QuintaDB предлагает готовые шаблоны CRM, показанные на рисунке 1, которые могут быть адаптированы под конкретные нужды пользователей. К таким шаблонам относятся решения для управления продажами, поддержки клиентов или учета лидов из рекламных кампаний. Примером применения может служить шаблон для заказа пиццы, который позволяет легко настроить напоминания о записи, учет расходных материалов и оценку эффективности работы сотрудников.

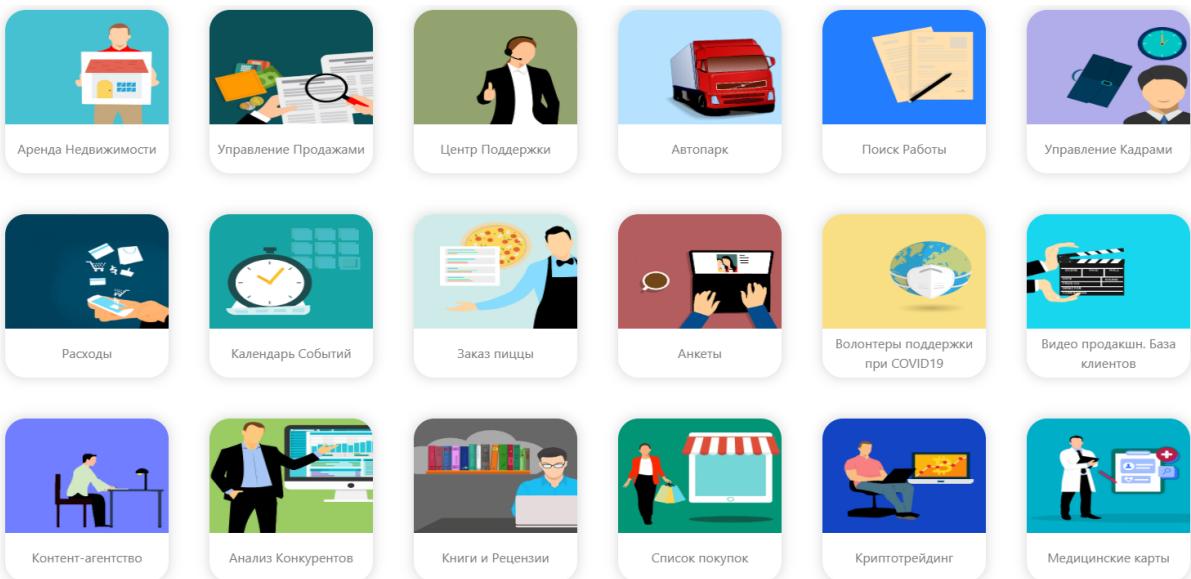


Рис. 1. Примеры шаблонов

QuintaDB демонстрирует ряд значительных преимуществ по сравнению с альтернативными платформами, включая экономию временных и финансовых ресурсов. Отсутствие необходимости в привлечении разработчиков позволяет организациям осуществлять создание и доработку CRM-системы силами внутренних сотрудников, таких как маркетологи и менеджеры. Гибкая тарифная сетка, охватывающая диапазон от бесплатного плана с базовым функционалом до корпоративных решений, обеспечивает доступность платформы даже для

стартапов. Дополнительно, система обладает возможностью масштабирования: по мере роста компаний пользователи могут интегрировать новые модули, такие как чат-боты для клиентской поддержки или инструменты для аналитики.

В качестве практического примера внедрения CRM на базе QuintaDB можно рассмотреть автоматизацию процессов в интернет-кафе. В данном случае осуществляется создание таблиц для учета заказов, формирования ассортимента, а также разработки формы заказа и визуализации ассортимента через фотографии (рисунок 2). Настраиваются автоматические уведомления о статусах доставки и интеграция с веб-сайтом. Результатом данной автоматизации становится сокращение времени обработки заказов и увеличение повторных продаж за счет персонализированных рассылок, что подтверждает эффективность применения данной платформы в бизнес-процессах.

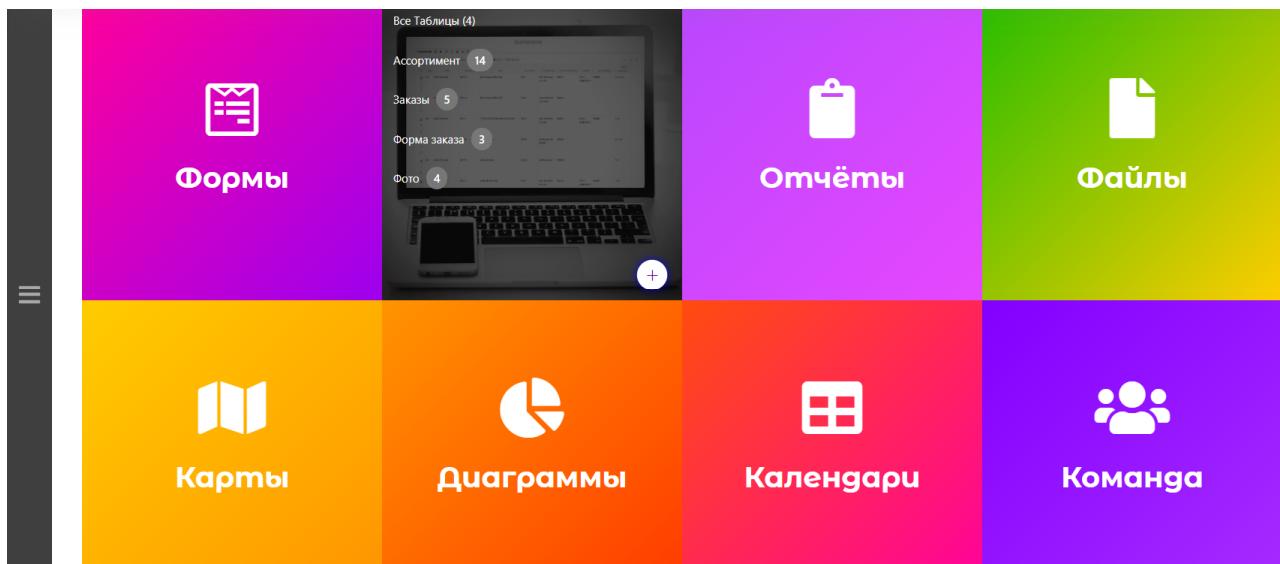


Рис. 2. Таблицы, создаваемые при открытии интернет-кафе

Тем не менее, у платформы имеются определенные ограничения. В частности, для реализации сложных сценариев, таких как внедрение алгоритмов машинного обучения или разработка многопользовательских мобильных приложений, возникает необходимость интеграции с внешними сервисами. Кроме того, бесплатный тарифный план ограничивает объем доступных данных и функциональные возможности, что может представлять собой препятствие для компаний, находящихся на этапе быстрого роста [2].

### Основные этапы разработки CRM-системы

#### 1. Определение требований

На данном этапе необходимо осуществить детальный анализ потребностей бизнеса, с целью выявления ключевых функций, которые должны быть интегрированы в CRM-систему. К числу таких функций могут относиться:

- Хранение контактной информации клиентов.
- Управление сделками и процессами продаж.
- Автоматизация маркетинговых кампаний.
- Формирование отчетности и аналитических данных.

#### 2. Проектирование структуры базы данных

Следующим шагом является создание схемы данных, что включает в себя определение основных таблиц, которые будут использованы в системе. В частности, необходимо рассмотреть следующие категории:

- Клиенты: включает имя, контактные данные и историю покупок.
- Сделки: охватывает статус сделки, сумму и дату закрытия.
- Взаимодействия: содержит заметки о встречах, телефонных звонках и переписке с клиентами.

### 3. Настройка пользовательского интерфейса

Разработка интуитивно понятного интерфейса для пользователей представляет собой критически важный аспект. Необходимо обеспечить доступность интерфейса для всех сотрудников, используя визуальные элементы (такие как кнопки и выпадающие списки) для упрощения навигации.

### 4. Разработка бизнес-логики

На этом этапе следует настроить автоматизацию бизнес-процессов. К примеру, это может включать:

- Уведомления о новых запросах или сделках.
- Напоминания о встречах с клиентами.
- Генерацию отчетов по продажам и оценку эффективности работы.

### 5. Тестирование системы

Перед внедрением системы крайне важно провести тестирование всех функциональных возможностей на предмет корректности работы и отсутствия ошибок. Включение сотрудников в процесс тестирования позволит получить ценную обратную связь относительно функциональности системы.

### 6. Обучение пользователей

Обучение сотрудников компании работе с новой системой является важным этапом внедрения. Рекомендуется обеспечить доступ к обучающим материалам и организовать поддержку пользователей в процессе освоения системы.

## **Автоматизация бизнес-процессов**

Одним из ключевых преимуществ внедрения CRM-систем является возможность автоматизации бизнес-процессов, что способствует повышению эффективности и оптимизации работы организации. На платформе QuintaDB предусмотрены инструменты для настройки автоматических уведомлений о новых запросах, напоминаний о встречах с клиентами, а также автоматической генерации отчетов о продажах. Данные функциональные возможности позволяют существенно сократить временные затраты на выполнение рутинных задач, что в свою очередь позволяет сосредоточить усилия сотрудников на более значимых аспектах бизнеса.

Примеры автоматизации:

1. *Уведомления.* Реализация механизма автоматической отправки уведомлений менеджерам при поступлении нового лица, что обеспечивает оперативное реагирование на запросы клиентов.
2. *Напоминания.* Настройка системы напоминаний о предстоящих встречах или выполнении задач, что способствует улучшению планирования и управлению временем сотрудников.
3. *Отчеты.* Автоматическая генерация отчетов по результатам продаж за определенный период, что позволяет обеспечить прозрачность и доступность аналитической информации для принятия управленческих решений.

Данные примеры демонстрируют потенциал автоматизации в рамках CRM-системы и ее влияние на оптимизацию бизнес-процессов.

В условиях современного рынка, характеризующегося высокой конкурентностью, малые и средние предприятия (МСП) сталкиваются с необходимостью оптимизации своих бизнес-процессов и улучшения взаимодействия с клиентами. Внедрение CRM-системы на базе QuintaDB предоставляет организациям новые возможности для достижения этих целей. Использование данной системы позволяет не только организовать данные о клиентах, но и автоматизировать рутинные операции, такие как обработка запросов, управление продажами и

ведение отчетности. Это, в свою очередь, освобождает ресурсы сотрудников, позволяя им сосредоточиться на более творческих и стратегических задачах, что способствует повышению общей продуктивности команды.

Тем не менее, внедрение CRM-системы представляет собой не одноразовый проект, а непрерывный процесс, требующий постоянного внимания к изменениям в бизнес-среде и потребностям клиентов. Успешная интеграция системы требует регулярного обновления данных, анализа результатов работы и постоянного обучения сотрудников. Эти аспекты имеют критическое значение для максимального использования возможностей системы и обеспечения ее актуальности в условиях динамичного рынка. Создание культуры, ориентированной на клиента, становится ключевым элементом данного процесса. Каждый сотрудник должен осознавать свою роль в формировании долгосрочных отношений с клиентами и понимать важность их удовлетворенности для достижения общих бизнес-целей.

С успешным внедрением CRM-системы компании могут ожидать не только роста объемов продаж, но и повышения уровня удовлетворенности клиентов. Улучшение взаимодействия с клиентами, персонализация предложений и оперативная реакция на запросы способствуют созданию положительного клиентского опыта. В условиях жесткой конкуренции уровень удовлетворенности клиентов становится критически важным фактором успеха бизнеса. Платформа QuintaDB предоставляет все необходимые инструменты для достижения этих целей, позволяя компаниям сосредоточиться на создании ценности для своих клиентов.

Таким образом, разработка CRM-системы на базе QuintaDB представляет собой стратегический шаг к более эффективному управлению бизнесом, который может существенно повлиять на его успех в будущем. Следуя рекомендациям по оптимизации работы с системой и активно используя ее функциональные возможности, компании смогут не только улучшить свои внутренние процессы, но и установить прочные отношения с клиентами. Это станет основой для устойчивого роста и развития бизнеса в долгосрочной перспективе. Важно отметить, что успешное внедрение CRM-системы является не только техническим процессом, но и культурным изменением внутри организации, требующим вовлеченности всех сотрудников и их готовности работать на достижение результата.

### Библиографический список

1. Усачев А.С. CRM-системы как основной инструмент цифрового менеджмента // Вестник Таганрогского института управления и экономики. – 2024. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/crm-sistemy-kak-osnovnoy-instrument-tsifrovogo-menedzhmenta> (дата обращения: 10.03.2025).
2. Зубрилин, А. А. Сетевые технологии в изучении баз данных в школе / А. А. Зубрилин, А. С. Прончатова, М. С. Зубрилина // Информатика в школе. – 2020. – № 5(158). – С. 32-39.

УДК 656.01; ГРНТИ 73.47.12

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ГУСТОЗАСЕЛЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

И.А. Живоложнев

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, jivolojnev123@gmail.com

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются методы сбора и обработки информации о характеристиках транспортной системы густозаселенной территории. Анализируются различные подходы, их классификация и параметры, влияющие на эффективность автоматизированного мониторинга и управления транспортными потоками. Особое внимание уделяется применению современных технологий, таких как интернет вещей (IoT) и технологии больших данных, а также их интеграции в существующую транспортную инфраструктуру. Обсуждаются перспективы развития данных технологий в контексте повышения эффективности транспортного планирования и управления дорожным движением.

**Ключевые слова:** автоматизация, транспортная система, сбор информации, обработка информации, мониторинг, управление транспортными потоками, транспортная инфраструктура, транспортное планирование, управление дорожным движением.

## AUTOMATION OF THE PROCESS OF COLLECTING AND PROCESSING INFORMATION ABOUT THE CHARACTERISTICS OF THE TRANSPORT SYSTEM OF A DENSELY POPULATED AREA

I.A. Zhivolozhnev

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, jivolojnev123@gmail.com

*Annotation.* This article discusses methods for collecting and processing information about the characteristics of a densely populated area's transport system. Various approaches, their classification and parameters affecting the effectiveness of automated monitoring and management of traffic flows are analyzed. Special attention is paid to the application of modern technologies such as the Internet of Things (IoT) and big data technologies, as well as their integration into the existing transport infrastructure. The prospects for the development of these technologies in the context of improving the efficiency of transport planning and traffic management are discussed.

*Keywords:* automation, transportation system, data collection, data processing, monitoring, traffic flow management, big data, transport infrastructure, transportation planning, traffic management.

Транспортная система – это совокупность технических и инфраструктурных объектов, удовлетворяющих потребность населения в перемещении между двумя и более точками густонаселенной территории. Развитие транспортной инфраструктуры в густозаселенных территориях требует точного и своевременного анализа транспортных потоков. Традиционные методы оценки, основанные на статистических отчетах и ручных наблюдениях, уступают место современным технологиям автоматизированного сбора и обработки данных. Данные о передвижении транспортных средств и пассажиров становятся все более доступными благодаря использованию датчиков, систем видеонаблюдения, GPS-трекеров и мобильных приложений.

Транспортная система представляет собой сложный комплекс, состоящий из различных элементов и взаимосвязей, обеспечивающих перемещение людей и грузов. Одной из главных характеристик этой системы является корреспонденция, которая отражает объективно существующую потребность человека в перемещении между двумя и более пунктами. Эта потребность может возникать по различным причинам, таким как работа, учеба, досуг или экстремальные ситуации.

Также важным аспектом транспортной системы являются пассажиропотоки. Они представляют собой перемещения людей, осуществляемые с помощью различных видов транспорта в определенные временные интервалы. Пассажиропотоки могут реализовываться через общественный и личный транспорт, пешие передвижения.

Современные подходы к анализу транспортных систем позволяют не только фиксировать текущее состояние данного комплекса, но и прогнозировать его изменения, выявлять проблемные зоны и разрабатывать эффективные решения по оптимизации транспортных потоков.

### Методы обследования корреспонденций

Наиболее распространены следующие расчетные и анкетные методы получения информации о корреспонденциях населения [2]. Анкетные методы, в свою очередь делятся на три вида:

- анкетное обследование генеральной совокупности;
- анкетирование по месту жительства;
- обследование сплошных баз данных.

Сущность расчетного метода заключается в определении теоретического числа поездок, которые может совершить человек. В расчётах за основу принимается 365 календарных дней в году. При пятидневной рабочей неделе учитываются 104 выходных, 20 отпускных и 14 праздничных дней, что даёт 227 рабочих дней в году. При шестидневной неделе — 52 выходных, 24 отпускных и 14 праздников, что соответствует 275 рабочим дням. Аналогично рассчитывается учебное время студентов: при пятидневной неделе — 84 выходных, 86 каникулярных и 14 праздничных дней, в итоге 181 рабочий день; при шестидневной — 42 выходных, 86 каникулярных и 14 праздничных дней, что даёт 223 рабочих дня в году.

Общее количество поездок, совершающееся за год данной группой населения, определяется как:

$$P = N \cdot K \cdot n \cdot p , \quad (1)$$

где  $P$  – число поездок в год данной группы населения;

$N$  – численность данной группы населения;

$K$  – коэффициент, учитывающий ту часть данной группы населения, которая воспользуется транспортом;

$n$  – число рабочих дней в году;

$p$  – количество поездок, совершающееся в день (при поездке на работу и обратно  $p=2$ ).

Суть всех анкетных методов заключается в разработке опросника, включающего вопросы о пунктах назначения поездок, времени их совершения, используемом виде транспорта и частоте передвижений. Далее анкеты заполняются самими участниками опроса. К основным преимуществам этих методов можно отнести простоту обработки и удобство формализации полученных данных. Однако к недостаткам относится риск искажения информации из-за заведомо неточных ответов респондентов или ошибок, допущенных как случайно, так и намеренно — как самими участниками, так и учетчиками.

Сплошное обследование баз данных предполагает использование уже существующих массивов информации, в которых содержатся сведения о месте проживания и месте работы граждан, с целью отслеживания их перемещений. В России, например, такую роль может выполнять база данных обязательного медицинского страхования. Среди достоинств этого подхода — высокая точность, сравнительно низкие трудозатраты и финансовые издержки, а также простота обработки и формализации данных. Вместе с тем, метод имеет и свои ограничения: сложности с доступом к подобным базам, необходимость обеспечения конфиденциальности персональных данных, а также потребность в привлечении большого числа специалистов для их обработки.

Достоинством данного метода является его простота. Недостатком является невозможность получения информации о конкретном распределении корреспонденций населения в пространстве и по используемому виду транспорта. С помощью данного метода можно определить только общую нагрузку на транспортную систему города.

### Методы обследования пассажиропотоков

Обследование пассажиропотоков осуществляется посредством фиксации всех проходящих мимо транспортных средств на остановках общественного транспорта с указанием ориентировочного числа перевозимых пассажиров.

*Традиционные методы* сбора информации о пассажиропотоках включают опросы пассажиров, ручной подсчет транспортных средств и анализ отчетности транспортных предприятий. Хотя эти методы позволяют получить определенные данные, они обладают рядом недостатков, таких, как: высокая трудоемкость, низкая оперативность и ограниченность в детализации.

Подобные исследования проводятся по следующей схеме. На первом этапе собираются данные о передвижении пассажиров на общественном и личном транспорте, а также о ре-

гулярности рейсов. Обследование проводится по направлениям (запад-восток и восток-запад) в разные временные интервалы (утро, день, вечер) и дни недели. Учетчики фиксируют транспортные средства и количество пассажиров в течение получаса на каждой стороне улицы, дважды в день. На втором этапе определяется количество пассажиров и средний интервал между транспортными средствами. Третий этап — расчет числа пассажиров между микрорайонами и количества легковых автомобилей, с учетом двух пассажиров в каждой машине.

*Автоматизированные методы* обеспечивают высокую точность и оперативность. Они включают в себя несколько ключевых технологий.

Датчики движения и видеонаблюдение устанавливаются на дорогах и перекрестках для фиксации количества транспортных средств, их скорости и направлений движения. Видеокамеры с возможностью распознавания номеров автомобилей позволяют отслеживать динамику движения и выявлять перегруженные участки дорог. Эти методы позволяют измерять такие параметры, как интенсивность транспортного потока (авто/час), средняя скорость движения (км/ч), плотность потока (авто/км) и время ожидания на перекрестках (сек).

Для более глубокого анализа пассажиропотоков и методов их мониторинга, можно обратить внимание на использование технологий видеоаналитики и искусственного интеллекта. В частности, исследование, проведённое специалистами компании «МосТрансПроект» (2024), продемонстрировало эффективность применения машинного зрения для анализа данных о пассажирах на ключевых пересадочных станциях московского метрополитена. Этот метод позволяет значительно повысить точность подсчёта и понимание потоков пассажиров без необходимости традиционных натурных обследований, что может быть полезно для оптимизации транспортной системы города [4].

GPS-трекеры используются для мониторинга перемещения общественного и коммерческого транспорта. Они позволяют собирать данные о скорости передвижения, задержках и отклонениях от маршрутов. На основе этих данных можно оценивать загруженность дорог и предлагать альтернативные маршруты. Основными параметрами, измеряемыми с помощью GPS-трекеров, являются точное местоположение транспортного средства, его скорость и направление движения, время прибытия на остановки и степень отклонения от запланированного маршрута.

Мобильные приложения предоставляют пользователям возможность сообщать о дорожной ситуации в реальном времени. Такие сервисы, как навигационные приложения, анализируют передвижение большого числа пользователей и прогнозируют заторы, предлагая водителям оптимальные маршруты с учетом текущей загруженности дорог. Для оценки транспортной ситуации анализируются такие показатели, как количество активных пользователей, среднее время в пути, коэффициент загруженности дорог (на основе скорости и плотности) и частота обновления данных.

Использование автоматизированных методов значительно повышает точность сбора данных и позволяет анализировать дорожную ситуацию в режиме реального времени. Внедрение этих технологий способствует эффективному управлению транспортными потоками, снижению количества пробок и повышению мобильности населения.

## **Заключение**

Автоматизация сбора и обработки информации о транспортной системе густозаселенной территории является ключевым фактором повышения эффективности управления дорожным движением. Применение современных технологий позволяет не только оперативно фиксировать транспортные потоки, но и анализировать их с высокой точностью, прогнозируя будущие изменения. Автоматизированные методы, такие как датчики, GPS-трекеры и мобильные приложения, обеспечивают оперативный сбор и обработку данных, что значительно повышает точность мониторинга. В свою очередь, методы анализа больших данных позволяют выстраивать стратегию управления транспортными потоками, снижать загруженность дорог и повышать комфорт передвижения.

Дальнейшее развитие этих технологий способствует созданию интеллектуальных транспортных систем, адаптирующихся к изменяющимся условиям движения и потребностям городского населения. Внедрение таких систем позволит сократить пробки, минимизировать время в пути и повысить экологическую устойчивость транспортной инфраструктуры. Будущее городского транспорта связано с интеграцией данных и автоматизацией процессов, что приведет к повышению общей мобильности и улучшению качества жизни населения.

### Библиографический список

1. Варелопуло Г. Организация движения и перевозок. М.: Транспорт, 1981.
2. Меркулов Ю.А., Ленков М.В. Формирование и автоматизированная обработка массива данных для построения транспортных моделей // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2024. Сборник трудов VII международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Рязань, 2023. Т. 6. С. 148-152.
3. Инфраструктура муниципальных образований./ под ред. П. В. Кухтина, М.: Кнорус, 2008.
4. МосТрансПроект. Считаем по головам: как проверить пассажиропотоки с помощью искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/mostransproekt/articles/878264/> (дата обращения: 15.01.2025).

УДК 004.021; ГРНТИ 50.51

## АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В CAD-СИСТЕМАХ: ПОВЫШЕНИЕ ГИБКОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ

А.М. Морозкин, М.В. Ленков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, lenkov.m.v@rsreu.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается роль параметрической оптимизации в современных системах компьютерного проектирования (CAD), её влияние на эффективность конструкторских решений и последние достижения в этой области. Основное внимание уделяется принципам работы алгоритмов параметрической оптимизации, их интеграции с передовыми технологиями, такими как искусственный интеллект и цифровые двойники, а также применению в различных отраслях промышленности. Приводится обзор текущих трендов и примеров практического использования, подчёркивается важность параметрической оптимизации для повышения качества продукции, снижения временных и материальных затрат, а также адаптации к изменяющимся требованиям рынка.

**Ключевые слова:** параметрическая оптимизация, CAD-система, искусственный интеллект, цифровые двойники, конструктивное проектирование, эффективность.

## ALGORITHMS OF PARAMETRIC OPTIMIZATION IN CAD-SYSTEMS: INCREASING FLEXIBILITY AND EFFICIENCY OF DESIGN SOLUTIONS

A.M. Morozkin, M.V. Lenkov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, lenkov.m.v@rsreu.ru

**Abstract.** The article examines the role of parametric optimization in modern computer-aided design (CAD) systems, its impact on the efficiency of design solutions, and recent advancements in this field. The focus is placed on the principles behind parametric optimization algorithms, their integration with cutting-edge technologies such as artificial intelligence and digital twins, as well as their application across various industries. Current trends are reviewed, practical examples are provided, and the importance of parametric optimization for improving product quality, reducing time and material costs, and adapting to changing market requirements is emphasized.

**Keywords:** Parametric optimization, CAD system, artificial intelligence, digital twins, design engineering, efficiency

## Введение

Современные инженерные проекты характеризуются высокой степенью сложности и необходимостью оперативного реагирования на меняющиеся требования рынка. В условиях глобальной цифровизации и быстрого технологического прогресса традиционные подходы к проектированию уступают место новым методологиям, среди которых одной из наиболее востребованных является параметрическая оптимизация. Этот метод не только улучшает качество разрабатываемой продукции, но и кардинально сокращает сроки её выхода на рынок. В данной статье мы рассмотрим основные принципы работы алгоритмов параметрической оптимизации, их влияние на эффективность конструкторских решений и выделим новейшие тенденции, формирующие будущее инженерии.

### Основные понятия параметрической оптимизации

Параметрическая оптимизация – это процесс поиска оптимальных значений параметров моделируемого объекта для достижения поставленных целей или соблюдения заданных критериев. В контексте CAD-систем речь идёт о нахождении наилучшего сочетания геометрических и функциональных параметров, способствующих достижению максимальной производительности, прочности, экономии ресурсов или других желаемых характеристик изделия.

Параметры могут включать в себя размеры, форму, материалы, нагрузки и другие переменные, определяющие функциональность и эксплуатационные свойства продукта. Оптимизационные алгоритмы систематически исследуют возможные комбинации этих параметров, оценивая каждую из них по предварительно заданным критериям и выбирая наиболее подходящую конфигурацию [1].

### Новые подходы к параметрической оптимизации

Последние достижения в области искусственного интеллекта и больших данных привели к появлению инновационных методов параметрической оптимизации. Использование машинного обучения и нейронных сетей позволяет значительно ускорить процесс поиска оптимальных решений, одновременно увеличивая точность и охват возможных вариантов. Генеративные модели, основанные на глубоких нейронных сетях, генерируют принципиально новые архитектурные и конструктивные решения, превосходящие человеческую интуицию [2].

### Принципы работы алгоритмов параметрической оптимизации

Процесс параметрической оптимизации строится на четырёх фундаментальных принципах:

1. *Постановка цели*: определение ключевой метрики, которую необходимо оптимизировать. Это может быть масса изделия, энергопотребление, стоимость производства или любая другая значимая характеристика.
2. *Задание ограничений*: установление граничных условий, накладываемых на параметры модели. Ограничения могут касаться габаритов, допустимых нагрузок, используемых материалов и других факторов, обеспечивающих безопасность и соответствие стандартам.
3. *Итеративный процесс*: автоматический перебор и оценка множества комбинаций параметров с целью нахождения наилучшей конфигурации. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет найдено решение, соответствующее всем поставленным задачам.
4. *Анализ результатов*: по окончании процесса оптимизации выдаются рекомендации по оптимальным значениям параметров и демонстрируются улучшения по сравнению с исходной версией модели.

## Современные тренды в параметрической оптимизации

На сегодняшний день параметрическая оптимизация переживает революционные изменения благодаря интеграции с передовыми технологиями. Рассмотрим некоторые из актуальных направлений:

1. *Мультидисциплинарная оптимизация*: объединяет несколько дисциплин (например, механика, электротехника, теплофизика) для комплексного подхода к проектированию. Это позволяет учитывать взаимозависимости между различными аспектами проекта и достигать сбалансированных решений.
2. *Оптимизация на основе искусственного интеллекта*: нейронные сети и алгоритмы глубокого обучения используются для автоматизации принятия решений и предсказания поведения объектов в реальных условиях [3]. Это повышает скорость и точность оптимизации, устранив необходимость в трудоемких физических испытаниях.
3. *Цифровые двойники*: создаются цифровые копии реальных объектов, которые точно воспроизводят их физические и динамические характеристики. Параметрическая оптимизация цифровых двойников позволяет тестировать различные сценарии и быстро выявлять оптимальные решения.
4. *Обратное проектирование*: методы обратного проектирования, основанные на параметрической оптимизации, применяются для восстановления и модернизации устаревших изделий. Это особенно актуально в условиях реинжиниринга и перехода к устойчивому развитию.

## Применение параметрической оптимизации в T-Flex CAD

T-Flex CAD — это мощная платформа для трёхмерного моделирования, предлагающая богатый арсенал инструментов для автоматизации инженерных процессов. Хотя встроенная функциональность для параметрической оптимизации здесь ограничена по сравнению с специализированными пакетами, такими как Ansys или OptiStruct, существуют действенные способы достижения схожих результатов:

1. *Скрипты и макросы*: поддержка написания макросов и скриптов на языке C# позволяет автоматизировать многие задачи оптимизации, адаптируя систему под конкретные потребности пользователей.
2. *Интеграция с внешними приложениями*: через API-интерфейсы можно подключить T-Flex CAD к специализированным инструментам численного анализа, таким как Ansys или MATLAB, что расширяет возможности параметрической оптимизации.
3. *Экспериментальные данные и обратная связь*: использование экспериментальных данных и обратной связи от производственных процессов позволяет улучшать модели и повышать точность прогнозов.

## Преимущества параметрической оптимизации

Использование параметрической оптимизации в CAD-системах обеспечивает значительные выгоды [4]:

1. *Снижение временных затрат*: автоматизация поиска оптимальных параметров исключает необходимость ручных операций, ускоряя процесс проектирования и тестирования.
2. *Повышение качества продукции*: более точное соответствие изделий заданным требованиям достигается благодаря системному анализу и учёту множества факторов.
3. *Экономия ресурсов*: оптимизация помогает снизить материальные и энергетические затраты, делая продукцию более конкурентоспособной.

4. *Адаптивность к изменениям:* гибкое управление параметрами позволяет оперативно вносить изменения в проект при смене требований или условий эксплуатации.
5. *Минимизация рисков:* Возможность смоделировать и проверить различные сценарии на ранних этапах проектирования снижает вероятность возникновения проблем в процессе эксплуатации.

### **Практическое применение**

Примером успешного применения параметрической оптимизации может служить автомобилестроительная отрасль, где она используется для улучшения аэродинамических характеристик кузовов, уменьшения массы автомобилей и повышения их безопасности. Аналогично, в аэрокосмической промышленности эта методика применяется для проектирования лёгких и прочных конструкций летательных аппаратов [5].

Также стоит упомянуть применение параметрической оптимизации в медицине, где создаются индивидуальные протезы и имплантаты, идеально подходящие конкретным пациентам. Технологии цифрового дизайна и аддитивного производства дополняют эту тенденцию, превращая индивидуальный подход в стандартную практику.

### **Заключение**

Алгоритмы параметрической оптимизации являются ключевым инструментом для повышения эффективности инженерных решений. Их интеграция с современными технологиями, такими как искусственный интеллект и цифровые двойники, выводит проектирование на качественно новый уровень. Благодаря этим инструментам компании получают возможность быстрее выводить на рынок конкурентоспособные продукты, соответствующие высоким стандартам качества и устойчивости.

Параметрическая оптимизация становится незаменимой составляющей современного инжиниринга, обеспечивая технологическую основу для устойчивого роста и инновационного лидерства в различных отраслях.

### **Библиографический список**

1. Иванов А.А. Алгоритмы параметрической оптимизации в САПР // Вестник науки и техники. – 2021. - № 10(15). – С. 123–135.
2. Петров В.С., Сидоров Е.В. Современные методы параметрической оптимизации в инженерных проектах. – М.: Наука, 2020. — 456 с.
3. Кузнецова Ю.И. Искусственный интеллект в параметрическом проектировании // Научные труды университета. – 2022. – Т. 21, вып. 2. – С. 34-45.
4. Оптимизация в CAD-системах / под ред. Смирнова Д.Н. – СПб.: Питер, 2019. – 312 с.
5. Соколова Н.Ю. Параметрическая оптимизация в машиностроении: опыт применения // Технические науки. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 89-101.

УДК 65.011.56; ГРНТИ 50.47.02

## **ВНЕШНИЙ И ВНУТРИЗАВОДСКОЙ УЧЁТ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Н.Ж. Некрасов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, rgrtunekrasov@yandex.ru*

**Аннотация.** Статья посвящена внедрению модели совокупности внутrizаводского и внешнего учета запасных частей промышленного оборудования в информационную автоматизацию. В статье рассматривается проблема замены ERP- и WMS-систем на более дешевый или некоммерческий аналог на основе баз данных.

**Ключевые слова:** база данных, ERP-система, WMS-система.

## EXTERNAL AND IN-HOUSE ACCOUNTING OF SPARE PARTS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

N.J. Nekrasov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, rgrtunekrasov@yandex.ru*

**Abstract.** The article is devoted to the implementation of the model of the combination of internal and external accounting of spare parts of industrial equipment in information automation. The article discusses the problem of replacing ERP and WMS systems with a cheaper or non-commercial database-based equivalent.

**Keywords:** database, ERP, WMS.

На сегодняшний день многие предприятия малого бизнеса в сфере промышленности не обладают материальными возможностями иметь современную ERP-систему учёта запасных частей. Менеджеры продолжают хранить информацию на бумажных носителях, что приводит к её потере. Таким образом, перед руководителями предприятий рано или поздно встаёт вопрос о том, как сохранить ту или иную информацию об обслуживании станков и сопутствующего оборудования в удобном структурированном виде с возможностью быстрого поиска.

В контексте обеспечения станков запасными частями стоит учитывать как внешнее участие, так и внутризаводское.

К внешним будем относить непосредственно производителей запасных частей с полной информацией о применимости, контакты с менеджерами, которые занимаются продажей запасных частей данного производителя, сроки поставок и наличие.

К внутренним относим учёт запасных частей, которые уже хранятся на предприятии, или завод ожидает их поступление. Это, прежде всего, количество на складах (остатки), расположение, категории запчастей, внутризаводская маркировка и многое другое.

Как видно из вышеперечисленного, внешний учёт подразумевает хранение информации, с помощью которой менеджеры по снабжению на заводе могут заказать непосредственно у производителей или у сторонних продавцов все необходимые для работы оборудования запасные части.

Внутренний учёт является неким аналогом ERP-систем управлении складом. То есть, предоставляет всю необходимую информацию о запчастях непосредственно с точки зрения планирования ресурсов предприятия. Тут важными показателями является количество запасных частей, хранимое на складах, их расположение внутри склада для быстрого поиска и прочее.

Тандем внешнего и внутризаводского учёта запасных частей даёт полное представление о том, что нужно делать менеджеру, чтобы наиболее простым образом обеспечить необходимыми ресурсами завод за короткий срок.

Реализация такой модели возможна с помощью различных баз данных (таких как MS Access), в которых существуют инструменты для структурирования, создания удобного интерфейса, возможность связи с другими программами на ПК и многое другое. Наиболее важно, что в БД можно связать данные между собой. Так, внешний учёт может быть в совокупности с внутризаводским, а это и есть то, что необходимо для эффективной работы по автоматизации учёта запасных частей.

Например, в MS Access можно создать 2 таблицы. Первая таблица с названием «Склад» будет включать в себя следующие поля: Название детали (текстовый тип данных), идентификационный номер (числовый тип данных), место на складе (текстовый тип данных), применимость (текстовый тип данных), остаток (числовый тип данных), полка (числовый тип данных), баркод (гиперссылка). Данная таблица будет хранить информацию о внутризаводском учёте деталей. Поле баркод хранит в себе файл формата pdf с внутризаводской марки-

ровкой запасной части, таким образом можно непосредственно из базы данных выводить на печать при помощи термопринтера наклейки для маркировки деталей на складе. Маркировка состоит из 3 символов: 1. Место на складе (указывает на зону хранения) 2. Полка (указывает на стеллаж на котором хранится запасная часть) 3. Идентификатор (собственный номер детали). Например, маркировка А12 означает, что деталь хранится на стеллаже А, 1-ой полке, и имеет идентификатор 2 (манжета). Этот простой способ упрощает поиск детали на складе, а также любой рабочий, зная комбинацию из трёх символов, может принести со склада нужную деталь. Пример похожей таблицы представлен на рисунке 1 в режиме конструктора и рисунке 2 в режиме таблицы.

Имя поля	Тип данных
Код_категории	Текстовый
Категория	Текстовый
Фирма	Текстовый
Артикул	Текстовый
Применимость	Текстовый
Место на складе	Текстовый
Полка	Текстовый
Идентификатор	Текстовый
Штрихкод для баркодера	Поле объекта OLE
Количество	Числовой
Название_запчасти	Текстовый

Рис. 1. Таблица “Склад” в режиме конструктор

Артикул	Применимость	Место на складе	Полка
2397867	IRON MAC гибочный,	A	2
4456437	SAY MAC гильотина,	A	2
896467	SAY MAC гильотина,	A	3
13LN	IRON MAC гибочный,	A	1
31MMK	SAY MAC гильотина,	B	3

Место на складе	Полка	Идентификатор
A	2	5
A	2	7
A	3	4

Рис. 2. Таблица “Склад” в режиме таблицы

Вторая таблица с названием «Поставщики» будет включать в себя поля: Поставщик (текстовый тип данных), почта поставщика (текстовый тип данных), менеджер (текстовый тип данных), категория (текстовый тип данных), название деталей (текстовый тип данных). Данная таблица отвечает за информацию о поставщиках для заказа необходимых запасных частей и представляет собой внешний учёт, тут учитывается вся информация о деталях, которые ещё не поступили на завод. Пример похожей таблицы представлен на рисунке 3 в режиме таблицы.

Код_категории	Категории	IRON MAC гильотина (КОНТАКТЫ)
1	Смазка	Роснефть 2397867; RDF 45673898
2	Поставщики смазок	Ftj@mail.ru; RDF.ru
3	Контактное лицо (Смазки)	Сергей Ftj +7 (4912) 79-87-77 ; Максим RDF +7 (4912) 56-76-78
4	Элементы для ТО	Манжета 567654; Соленоид AR643542335
5	Поставщики ТО	PSP-box.su
6	Контактное лицо (ТО)	Владимир PSP +7-908-878-87-99
7	Ремонт	Serviskrzn.ru
8	Контактное лицо (Ремонт)	Владимир Servis +7-908-878-87-96; Сергей Servis Электрик +7-917-658-23-21
9	Электрические элементы	Резистор 7565435
10	Поставщик (Электрика)	Bigvolt.su; HGNshop
11	контактное лицо (Электрика)	Дмитрий bigvolt+7 (4912) 90-87-87
12	Основные элементы оборудования	Тормоз 754456GF
13	Поставщики(ОЭ)	GTRF.ru; PSP-box.su
14	Контактное лицо(ОЭ)	Александр GTRF +7-908-878-87-99; Владимир PSP +7-908-878-87-99

Рис. 3. Таблица “Поставщики” в режиме таблицы

Далее с помощью запросов можно выводить необходимую информацию из представленных таблиц, сортировать её и изменять в зависимости от поставленных задач, для простого взаимодействия с базой данных, можно создать удобный интерфейс с помощью форм (добавить навигационные клавиши, одновременно выводить информацию из нескольких таблиц и другое). Пример формы, созданной в MS Access можно увидеть на рисунке 4.

Рис. 4. Форма “Запасные части для IRON MAC”

Как итог, модель совокупности внешнего и внутризаводского учёта запасных частей промышленного оборудования является достаточно полной для осуществления информационной автоматизации. При программной реализации с помощью баз данных также может стать значительно более дешёвым или в некоторых случаях некоммерческим аналогом ERP и WMS систем.

Для лучшего понимания вышеперечисленных систем, следует провести их анализ с выделением основных особенностей, сходств и различий, преимуществ и недостатков.

Управление запасами является критически важным аспектом логистики и производственных процессов. В современном бизнесе широко используются различные системы для оптимизации управления складом, среди которых выделяются ERP (Enterprise Resource Planning) и WMS (Warehouse Management System) системы. В настоящем анализе будут рассмотрены ключевые особенности ERP и WMS систем и сравнены они с системой управления складом, основанной на базе данных, применяемой для учета запасных частей станков.

#### Основные понятия

1. ERP системы представляют собой интегрированные программные решения, которые охватывают все аспекты управления предприятием, включая финансы, производство, HR, продажи и дистрибуцию. Они обеспечивают централизованный доступ к данным и процессы управления.

2. WMS системы специализированы для управления складскими операциями. Они фокусируются на автоматизации процессов хранения, сбора, упаковки и отгрузки товаров. WMS помогает оптимизировать пространство, управлять запасами и повышать производительность труда на складе.

### 3. Система управления складом на основе баз данных

- Это система, созданная на основе реляционных или других баз данных, предназначенная для учета и управления запасными частями. Она может включать функционал, аналогичный WMS, но часто без интеграции с другими бизнес-процессами, предоставляемыми ERP.

#### *Сравнительный анализ*

##### 1.Функциональность

- ERP: Включает широкие функциональные модули, включая закупки, бухгалтерский учет, отчетность. Позволяет интегрировать данные из разных отделов для получения полной картины о работе предприятия.

- WMS: фокусируется на специфических задачах складского учета, таких как местоположение товаров, автоматизация сборки заказов и управление доставкой. Обеспечивает механизмы для оптимизации логистических процессов.

- Система на базе данных: предоставляет базовый функционал, направленный на управление запасами и учет запасных частей, но не включает в себя интеграцию с другими подразделениями фирмы. Чаще всего требует дополнительных усилий для обеспечения связи с нужными отделами.

##### 2. Интеграция и совместимость

- ERP: Обеспечивает интеграцию всех бизнес-процессов, что позволяет избежать дублирования данных и упрощает доступ к информации в реальном времени.

- WMS: Может быть интегрирована с ERP, но также может работать как автономная система. Обеспечивает глубокую интеграцию с оборудованием, таким как сканеры штрих-кодов и системы автоматизации.

- Система на базе данных: обычно требует значительных усилий для интеграции с другими системами. По сравнению с ERP и WMS, такая система может быть менее гибкой и требовать ручного ввода данных.

##### 3. Пользовательский интерфейс и удобство работы

- ERP: обычно имеет сложный интерфейс с множеством функций, что может потребовать времени для обучения сотрудников. Однако, современные ERP системы становятся всё более интуитивными и ориентированными на пользователя.

- WMS: Интерфейс часто более специализирован и адаптирован под нужды складских работников. Обучение может занять меньше времени за счет более узкой направленности системы.

- Система на базе данных: может быть простой и удобной для пользователей, но часто ограничена в возможностях и функциональности. Потребность в кастомизации может осложнить процесс работы с системой.

##### 4. Стоимость внедрения и эксплуатации

- ERP: внедрение ERP обычно требует значительных инвестиций, как в первоначальную оплату за программное обеспечение, так и в обучение и поддержку. Однако, оно может снизить книги затрат на управление благодаря оптимизации процессов.

- WMS: часто более доступно по ценовому спектру, особенно для небольших и средних предприятий, но может требовать дополнительных расходов на оборудование и интеграцию.

- Система на базе данных: может быть самой экономичной, но часто потребует затрат на доработку и поддержку, особенно если система начинает устаревать.

### 5. Гибкость и масштабируемость

- ERP: предоставляет высокую степень гибкости и масштабируемости, позволяя компаниям адаптироваться к изменениям на рынке без необходимости значительных изменений в системе.

- WMS: также высоко масштабируема, особенно если система построена с использованием модульного подхода.

- Система на базе данных: ограниченная гибкость и масштабируемость, что может привести к необходимости перехода на более продвинутую систему по мере роста бизнеса.

Выбор между ERP, WMS и системой управления складом на основе баз данных зависит от специфики бизнеса, масштабов и потребностей. Для крупных предприятий, стремящихся к интеграции процессов, ERP системы могут стать оптимальным выбором. WMS подойдут для компаний, нуждающихся в специализированном управлении складом. Система на базе данных может быть приемлема для небольших бизнесов или в ситуациях с низкими объемами операций.

1. Гуничева И.А. ERP и WMS: выбор продукта для информационного управления складом // Научный альманах (Экономические науки). 2013. URL: [https://www.miit.ru/content/id\\_wm=779307](https://www.miit.ru/content/id_wm=779307) (дата обращения: 27.02.2025).

УДК 004.896; ГРНТИ 50.49.37

## ИНТЕГРАЦИЯ ИОТ И BIG DATA ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА РАБОТЫ СТАНКОВ С ЧПУ

Г.А. Попов, М.В. Ленков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kirtyi033@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается интеграция технологий Интернета вещей (IoT) и больших данных (Big Data) в производственные процессы, особенно в контексте станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Основное внимание уделяется решению проблем неэффективности и высокого процента брака на производстве через анализ данных и автоматизацию процессов. Описывается роль IoT в создании сетей взаимосвязанных устройств для мониторинга и управления производственными процессами в реальном времени. Также рассматриваются проблемы, такие как кибербезопасность и интеграция с устаревшим оборудованием.

**Ключевые слова:** технологии, производственные процессы, интернет вещей (IoT), большие данные (Big Data), эффективность производственного процесса.

## INTEGRATION OF IoT AND BIG DATA FOR MONITORING AND ANALYZING THE OPERATION OF CNC MACHINES

G.A. Popov, M.V. Lenkov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, kirtyi033@gmail.com

**Abstract.** The article examines the integration of Internet of Things (IoT) and Big Data technologies into production processes, especially in the context of numerical control machines (CNC). The main focus is on solving the problems of inefficiency and high failure rates in production through data analysis and process automation. The role of IoT in creating networks of interconnected devices for monitoring and managing production processes in real time is described. Issues such as cyber security and integration with outdated hardware are also being addressed.

**Keywords:** technologies, production processes, Internet of Things (IoT), Big Data (Big Data), production process efficiency.

В последние десятилетия мир стал свидетелем стремительного развития технологий, которые кардинально изменили подходы к производственным процессам. Одной из наиболее значимых тенденций является интеграция Интернета вещей (IoT) и больших данных (Big Data), что открывает новые горизонты для повышения эффективности и качества производственной деятельности. В частности, в области станков с ЧПУ эта интеграция становится особенно актуальной, поскольку позволяет не только автоматизировать процессы, но и значительно улучшить их анализ и управление, сокращая время простоя и минимизируя человеческие ошибки.

Станки с ЧПУ играют ключевую роль в современном производстве, обеспечивая высокую точность и скорость обработки материалов. Однако, несмотря на их преимущества, многие предприятия сталкиваются с проблемами неэффективности и высоким процентом брака. Эти проблемы часто возникают из-за недостатка анализа данных, что приводит к нерациональному использованию ресурсов и увеличению затрат. В условиях жесткой конкуренции на рынке производители вынуждены искать новые решения, которые позволят им оптимизировать свои процессы и повысить качество продукции. В этом контексте интеграция IoT и Big Data становится не просто желательной, а необходимой [1].

Интернет вещей (IoT) революционизирует подходы к производственным процессам, создавая условия для более эффективного мониторинга и управления. В контексте промышленных приложений IoT используется для создания сетей взаимосвязанных устройств, которые позволяют собирать и анализировать данные в реальном времени. Это является основой для создания инновационных решений в рамках концепции IIoT (Industrial Internet of Things), которая фокусируется на оптимизации производственных процессов через интеграцию новых технологий и систем. Например, Siemens MindSphere — облачная платформа IIoT — объединяет данные с тысячами датчиков, обеспечивая предиктивную аналитику и управление активами.

Внедрение IoT-технологий в производство позволяет отслеживать состояние оборудования, что значительно повышает надежность и снижает вероятность возникновения неожиданных поломок. Системы, построенные на основе IoT, способны не только фиксировать текущие параметры работы оборудования, но и предсказывать потенциальные сбои. Такие возможности обеспечиваются использованием методов машинного обучения, которые анализируют исторические и текущие данные.

Основу этой интеграции составляют датчики, встроенные в станки. Они фиксируют вибрацию, температуру, энергопотребление, усилие резания и другие параметры. Эти данные передаются через промышленные протоколы связи, такие как OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture), обеспечивающий безопасную интеграцию оборудования, и MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), оптимизированный для облачных платформ. Важную роль играют Edge-устройства, которые обрабатывают информацию на периферии, снижая нагрузку на сеть. Edge Computing позволяет фильтровать шумы, анализировать аномалии в реальном времени и даже принимать локальные решения. Например, при обнаружении критического уровня вибрации Edge-устройство может мгновенно остановить станок, предотвращая поломку. Это особенно важно в условиях ограниченной пропускной способности сетей, где задержки в передаче данных в облако могут привести к катастрофическим последствиям.

Собранные данные поступают в облачные хранилища через промышленные IoT-платформы, такие как Siemens MindSphere [2]. Здесь в игру вступают технологии Big Data.

Анализ больших объемов данных с помощью Big Data позволяет выявлять скрытые закономерности и тенденции. В контексте управления предприятием технического обслуживания Big Data аналитика может применяться для оптимизации графиков обслуживания, прогнозирования потребности в запчастях и определения наиболее эффективных стратегий технического обслуживания. Машинное обучение и искусственный интеллект создают алгоритмы для обнаружения аномалий в данных, прогнозирования будущих событий и автомати-

зации принятия решений. Эти методы улучшают реакцию на проблемы и качество обслуживания оборудования в рамках управления техническим обслуживанием. Интеграция различных источников данных и аналитических инструментов создаёт единое информационное пространство для анализа и принятия обоснованных решений, что способствует эффективному управлению предприятием технического обслуживания.

Для эффективного сбора и анализа данных необходимо учитывать важность предварительной обработки информации. Необходимо правильно структурировать данные, чтобы обеспечить их совместимость с методами анализа. Этот процесс включает в себя чистку данных от ошибок и аномалий, а также нормализацию различных показателей, собранных с помощью IoT-датчиков на станках с ЧПУ.

Для хранения структурированных данных, поступающих со станков значений переменных, используются SQL-базы, а неструктурированные данные, например, видео с камер контроля, сохраняются в NoSQL-хранилищах MongoDB. Обработка данных включает как потоковую аналитику через Apache Kafka для реального времени, так и пакетную обработку с помощью Apache Spark.

В России ярким примером служит платформа WINNUM, которая поддерживает более 50 промышленных протоколов и собирает до 300 параметров с каждого станка. Её алгоритмы в режиме реального времени сравнивают фактические показатели с эталонными. Например, на заводе ЗАО «РЗЗ» (Алмаз) внедрение WINNUM уменьшило расход инструмента на 15%, а на предприятии АО «НПЦ АП» загрузка оборудования выросла на 17%. Платформа использует цифровые двойники для виртуального тестирования программ ЧПУ и предоставляет данные через веб-интерфейс, что позволяет инженерам управлять процессами удалённо [3].

Один из главных эффектов внедрения больших данных и аналитики заключается в повышении общей производительности станков с ЧПУ. Получаемые в реальном времени данные помогают мгновенно идентифицировать узкие места и неполадки в производственных процессах, что позволяет своевременно принять меры для их устранения. Это обеспечивает стабильную работу оборудования и предотвращает непредвиденные простои, что, в свою очередь, значительно увеличивает общую производительность. В контексте индустрии 4.0, объединение технологий IoT и Big Data открывает новые горизонты для интеллектуального анализа производственных процессов. Системы, работающие на основе анализа данных, могут генерировать рекомендации и автоматически вносить изменения в процесс управления, ориентируясь на имеющиеся данные и выбранные алгоритмы.

Однако внедрение этих технологий сопряжено с вызовами. Кибербезопасность остается критической проблемой – атаки вроде Stuxnet показывают уязвимость промышленных сетей [4]. Решением может быть использование шифрования данных по стандарту AES-256. Другая сложность — интеграция с устаревшим оборудованием. Для станков, которые не поддерживают IoT «из коробки», используются адаптеры OPC UA и шлюзы на базе Raspberry Pi с открытым ПО.

Таким образом, интеграция IoT и Big Data превращает ЧПУ-станки из изолированных единиц в элементы глобальной интеллектуальной системы. Предприятия, внедряющие эти технологии, не только повышают эффективность, но и закладывают основу для перехода к Industry 4.0 и 5.0, где цифровизация становится ключом к конкурентоспособности. Интеграция IoT и Big Data в производственные процессы открывает широкие перспективы для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий. Хотя этот путь сопровождается определенными проблемами, преимущества, такие как повышение надежности оборудования, сокращение простоев и снижение затрат, делают его привлекательным для большинства производителей. Дальнейшие исследования и разработки в этой области обещают еще больше возможностей для автоматизации и оптимизации производственных процессов, делая современное производство более умным, гибким и устойчивым к изменениям внешней среды.

## Библиографический список

1. А.А. Абрамова. Анализ использования больших данных для принятия решений в промышленной сфере // Экономика и качество систем связи. 2023. №3 (29). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ispolzovaniya-bolshih-dannyyh-dlya-prinyatiya-resheniy-v-promyshlennoy-sfere>.
2. Д. И. Соколов, С. Ю. Соловьёв. Контроль и мониторинг промышленного оборудования с использованием платформы MindSphere компании Siemens / Д. И. Соколов, С. Ю. Соловьёв. [Электронный ресурс] // Журнал «ИСУП». : [сайт]. – URL: <https://isup.ru/articles/2/13235>.
3. WINNUM Станки / [Электронный ресурс] // WINNUM Станки - мониторинг, контроль и анализ работы станков с ЧПУ и без. Цифровой двойник производства.: [сайт]. — URL: <https://winnum.io>.
4. Е. Снегирева. Киберугрозы для промышленности: industrial IoT / Е. Снегирева [Электронный ресурс] // Positive Technologies : [сайт]. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/kiberugrozy-dlya-promyshlennosti-industrial-IoT>.

УДК 62-9; ГРНТИ 50.43

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНФОРМИРОВАНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ КОТЕЛЬНОЙ

С.Г. Сморчков, М.В. Ленков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [ssmorchkov2001@gmail.com](mailto:ssmorchkov2001@gmail.com)

**Аннотация.** Расширение возможностей системы мониторинга режимов работы тепловых пунктов на основе автоматизированного информирования о параметрах их технологического оборудования на основе передачи коротких СМС-сообщений является современным решением, позволяющим эффективно реализовывать процесс теплоснабжения и оперативно предотвращать возможные аварийные ситуации. В статье рассматриваются принципы работы автоматизированной системы уведомлений на базе GSM-технологий, преимущества и особенности её технической реализации и практического внедрения.

**Ключевые слова:** котельная, автоматизация, СМС-оповещение, GSM-модем.

## AUTOMATED INFORMATION SYSTEM ON THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE BOILER ROOM

S.G. Smorchkov, M.V. Lenkov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [ssmorchkov2001@gmail.com](mailto:ssmorchkov2001@gmail.com)

**The summary.** Expanding the capabilities of the system for monitoring the operating modes of heating points based on automated information about the parameters of their technological equipment based on the transmission of short SMS messages is a modern solution that makes it possible to effectively implement the heat supply process and promptly prevent possible emergencies. The article discusses the principles of an automated notification system based on GSM technologies, the advantages and features of its technical implementation and practical implementation.

**Keywords:** boiler room, automation, SMS notification, GSM modem.

Современные котельные установки требуют постоянного мониторинга ключевых параметров, таких как температура, давление, уровень топлива и состояние оборудования. Ручной контроль не всегда эффективен, особенно в удалённых или автоматизированных системах. Решением является внедрение системы автоматического СМС-оповещения, которая оперативно уведомляет ответственных лиц о критических изменениях в работе котельной.

### Преимущества автоматизированного способа оповещения методом СМС-сообщений

Технология передачи информации в формате СМС-сообщений по GSM-каналу является одной из наиболее эффективной по ряду следующих причин:

1. Мгновенное оповещение в реальном времени.

Датчики непрерывно передают данные на контроллер, который при отклонении параметров от нормы сразу отправляет СМС-сообщения ответственным лицам.

Это необходимо для решения следующих технологических задач:

- аварийные ситуации требуют немедленного реагирования (например, скачок давления может привести к разрыву труб);
- человек не может мониторить рабочие показатели 24/7, а автоматика – может;
- СМС-сообщение приходит за 2–5 секунд, в отличие от проверки логов или ручного обхода оборудования.

## 2. Независимость от интернета и локальных сетей.

Следует отметить сложности, связанные с применением других систем оповещения:

- электронная почта, мессенджеры, интерфейс SCADA – требуют стабильного интернета;
- локальная свето-звуковая сигнализация малоэффективна в условиях отсутствия персонала.

На основании сказанного выделим явные преимущества использования СМС-оповещения:

- работает через GSM-сети (даже при отключении электричества, если есть резервный аккумулятор);
- не зависит от работы беспроводных сетей, локальных сетей или облачных сервисов;
- повышение безопасности работы технологической установки и предотвращение аварий.

Это позволяет своевременно отследить следующие технические сценарии работы котельной установки в условиях критических значений (таблица 1):

Таблица 1. Аварийные технологические параметры

Технологический параметр	Последствия при отсутствии СМС-оповещения	Результат с применением СМС-оповещения
Перегрев котла	Разрушение теплообменника, пожар	Уведомление при +90°C и остановка котла
Утечка газа	Взрыв, отравление	Срабатывание датчика загазованности и автоматическое отключение
Падение давления	Разморозка системы зимой	Оповещение при давлении <1 бар и запуск резервного насоса

Работа автоматизированной системы оповещения на базе СМС-сообщений позволяет повысить следующие технико-экономические показатели:

## 1. Экономия на обслуживании и ремонте, за счет:

- раннее обнаружение неисправностей, что позволяет дешевле устранить поломку на ранней стадии;
- снижение простоев за счет удалённого контроля и управления технологическим оборудованием диспетчера;
- увеличение срока службы котла при сокращении времени его работы в аварийных режимах.

2. Гибкость настройки и персонализация двух типов технологических показателей котельной установки:

- основные: температура, давление, уровень топлива.

- дополнительные: наличие напряжения в электросети (отключение электричества), состояние дымохода (засорение), время работы оборудования и период проведения регламентных работ (напоминание о ТО).

Основными получателями СМС-сообщений являются следующие категории работников:

- технический персонал – аварийные сообщения;

- директор/управляющий – сводки по режимам работы.

### Технология автоматического СМС-оповещения для котельных

Функционально система СМС-оповещения представлена на рисунке 1 и состоит из 3 основных технических блоков [3]:

1. Датчики (термопары, датчики давления, датчики уровня), которые измеряют параметры.
2. Контроллер (ПЛК, Arduino, Raspberry Pi), который производит обработку данных и принятие решения об отправке СМС-сообщения.
3. GSM-модуль (ПМ01 GSM/GPRS модем компании «ОВЕН»), который выполняет отправку СМС-сообщения через мобильную сеть.



Рис. 1. Структура системы автоматического SMS-оповещения

### Алгоритм работы аппаратного комплекса передачи СМС-сообщений

Алгоритм работы системы сбора, обработки и передачи информации о состоянии технологического оборудования котельной предусматривает три основных этапа.

Этап 1: Сбор данных с датчиков.

Датчики непрерывно измеряют следующие критические параметры:

- температура (котла, воды);
- давление (в котле, магистралях);
- уровень топлива (газ, дизель, уголь);
- напряжение электросети (отключение электричества).

В установке датчик давления, обеспечивающий измерение величины в диапазоне 0–10 бар, передаёт эквивалентный электрический сигнал 4–20 мА на контроллер, который конвертирует его в цифровое значение давление.

Этап 2: Анализ данных контроллером.

Контроллер сравнивает полученные значения с заранее заданными пределами, указанными в таблице 2:

Таблица 2. Пример уставок параметров

Параметр	Норма	Предупреждение	Авария
Температура котла	< 90°C	90–95°C	> 95°C
Давление	1.5–2.5 бар	2.5–3.0 бар	> 3.0 бар

Логика работы системы СМС-оповещения:

1. Если температура более 95°C, тогда формируется сообщение "АВАРИЯ: Перегрев котла!"
2. Если давление превышает 3 бар, тогда формируется сообщение "ВНИМАНИЕ: Давление превышено!"

Этап 3: Формирование СМС-сообщения.

Контроллер генерирует текст уведомления, включая следующие атрибуты:

- тип события (авария, предупреждение);
- значение параметра (например, "Температура: 97°C");
- время и дату.

Пример сообщения:

«Ошибка 12.03.2025 14:30

Котёл №1: Температура 97°C (макс. 95°C)

Давление: 3.2 бар

Требуется немедленная проверка!»

### Пример разработки системы оповещения с использованием ПЛК ОВЕН среды программирования Codesys

Для реализации алгоритма автоматической передачи СМС-сообщений была разработана программная модель в среде Codesys, представленная на рисунке 2.

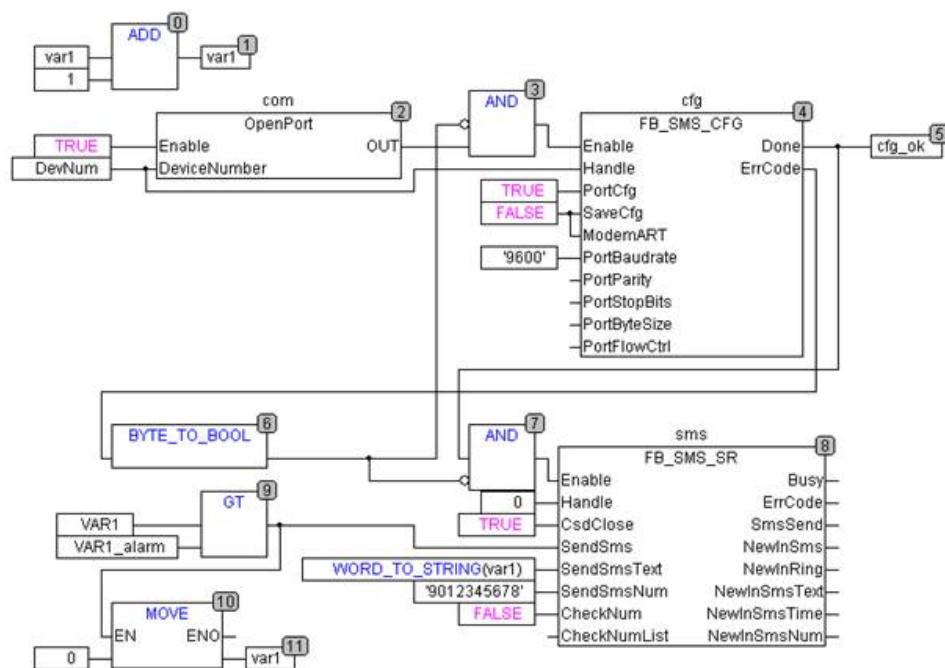


Рис. 2. Пример разработки системы оповещения в среде программирования Codesys

Её особенностью является добавление переменной (var1), которая будет постоянно расти и по достижению определенного уровня система обеспечит отправку сообщения.

Программная модель работает следующим образом. На вход «SendSmsNum» подается десятизначный номер получателя в формате строки (String). На вход «SendSmsText» подается преобразованной к типу String значение переменной «var1». По приходу на вход «SendSms» значения True, значения на двух предыдущих входах будут зафиксированы внутри FB. Как только сообщение будет отправлено на выход «SmsSend» будет подан единичный импульс (значение True будет установлено на один цикл) [4].

Процедура, реализующая алгоритм отправки СМС-сообщения:

```

Список переменных
PROGRAM PLC_PRG
VAR
Com      :OpenPort;
cfg       :FB_SMS_CFG;
sms       :FB_SMS_SR;
cfg_ok   :BOOL;
DevNum   :WORD :=0;
var1     :WORD; (*переменная, которая будет расти*)
var1_Alarm :WORD :=5000; (*ее аварийный уровень*)
END_VAR

```

### **Библиографический список**

1. Иванов А.В. Автоматизация котельных установок. - М.: Энергоатомиздат, 2018. - 320 с.
2. Петров С.К. SCADA-системы в теплоэнергетике. - СПб.: БХВ-Петербург, 2020. - 256 с.
3. Сидоров Н.П. GSM-модемы в промышленной автоматизации. - М.: ДМК Пресс, 2019. - 184 с.
4. Руководство по работе с SMS-модулями OWEN : электрон. документ. – М. : OWEN, 2023. – URL: <https://owen.ru/uploads/373/smsowenlib.pdf>.

УДК 621.65.05; ГРНТИ 50.43

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ**

**Н.М. Хлебников, М.В. Ленков**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, lenkov.m.v@rsreu.ru*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрено применение средств автоматизации на станции перекачки нефти. Описано применение средств автоматического регулирования для обеспечения работы магистрального насосного агрегата.

**Ключевые слова:** магистральная насосная станция (МНС), нефтеперекачивающая станция (НПС), автоматизация, технологический процесс, контроль

## **THE SYSTEM OF AUTOMATIC REGULATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE OIL PUMPING STATION**

**N.M. Khlebnikov, M.V. Lenkov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, lenkov.m.v@rsreu.ru*

**Abstract.** This article discusses the use of automation tools at an oil pumping station. The application of automatic control means to ensure the operation of the main pumping unit is described.

**Keywords:** main pumping station (MNS), oil pumping station (NPS), automation, technological process, control

### **Технологическое описание НПС**

В структуру технологического объекта управления перекачкой нефтепродуктов входят следующие блоки [1]:

- Магистральная насосная станция, включающая четыре насосных агрегата и систему регуляции давления.
- Вспомогательные установки, обеспечивающие бесперебойную работу насосного оборудования (например, маслосистема).

- Дополнительные системы, поддерживающие оптимальные условия в производственных помещениях насосной подстанции, такие как приточно-вытяжная вентиляция, система отводов утечек и система пожарной безопасности.

На объекте НПС поток нефти проходит через ряд этапов: узел подключения станции к магистрали, фильтры-грязеуловители, насосная установка магистрального типа, система регулирования давления, узел подключения, магистраль.

Технологические объекты управления (ТОУ) классифицируются по их информационным характеристикам, разделяясь на системы, каждая из которых включает управляющие элементы, состоящие из составных блоков, именуемых подобъектами. В таблице 1 представлена структурная разбивка ТОУ на системы, объекты и подобъекты.

Таблица 1 - Технологическая классификация ТОУ

Наименование системы	Технологические объекты
Узел регулирования давления	задвижки САР, регулирующие заслонки
Маслосистема	маслонасос, маслобак, маслофильтр, маслонаправляющая линия к МНА, аккумулирующий бак
Вытяжная вентиляция блока гашения ударной волны	вытяжной вентилятор (1шт)
Система пожаротушения НПС	пенонасос, коллектор подачи пены (пеноналиния), задвижки подачи пены к объектам, резервуар раствора пенообразователя, водонасос
Система энергоснабжения	ввод секций шин 10кВ в составе: 1. Вводной масляный выключатель, 2. Секционный масляный выключатель, 3. Масляный выключатель электродвигателя, 4. ДЭС - секция шин 10кВ, 5. Секция шин 1ЩСУ, 6. Секция шин 2ЩСУ, 7. Секция шин 3ЩСУ, 8. Секция шин ЩСУ ССВД, 9. Секция шин ЩСУ КТП

Трубопроводы насосной подключаются к магистральному нефтепроводу в узле пропуска средств очистки и диагностики (СОД), где устанавливаются задвижки, отсекающие насосную от магистрали. Узел СОД позволяет вести перекачку нефти как через магистральную насосную, так и минуя ее.

### Фильтры-грязеуловители

Согласно технологическому процессу, нефть, передвигаясь по трубопроводу, попадает в систему фильтров-грязеуловителей. Эти устройства играют ключевую роль в защите насосов от загрязнений, таких как грязь и парафин, которые могут находиться как в самой нефти, так и в трубопроводах. На площадке, предшествующей магистральной насосной установке, устанавливаются фильтры-грязеуловители. Для их очистки вначале закрываются задвижки на очищаемом фильтре, после чего активируется резервный фильтр для обеспечения непрерывной работы [2].

### Магистральный насосный агрегат

Магистральный насосный агрегат (МНА) состоит из нескольких ключевых компонентов: насоса, электродвигателя, а также задвижек для приема и выкидки [1].

Насос представляет собой устройство, предназначенное для принудительного перемещения жидкости от зоны с низким давлением (в линии всасывания) к зоне с высоким давлением (в линии нагнетания).

Для перекачки нефти на большие расстояния используются центробежные насосы, которые являются основным типом нагнетательного оборудования, соответствующим всем необходимым стандартам для эффективной работы с большими объемами нефти.

На магистральных нефтепроводах, использующих промежуточные насосные станции, для обеспечения нормального функционирования критически важен подпор, который создается за счет работы предыдущей перекачивающей станции.

### Узел регулирования давления

Система управления давлением играет ключевую роль в поддержании установленного давления на протяжении всей трассы, обеспечивая защиту от резких падений давления на всасывающей линии и предотвращая его чрезмерный рост на линии нагнетания.

Автоматическая система регулирования (АСР) предназначена для сохранения безопасного уровня давления нефти в трубопроводах при максимально возможной производительности. Она представляет собой интеграцию объекта регулирования и механизма автоматического контроля. Функциональная схема АСР проиллюстрирована на рисунке 1.

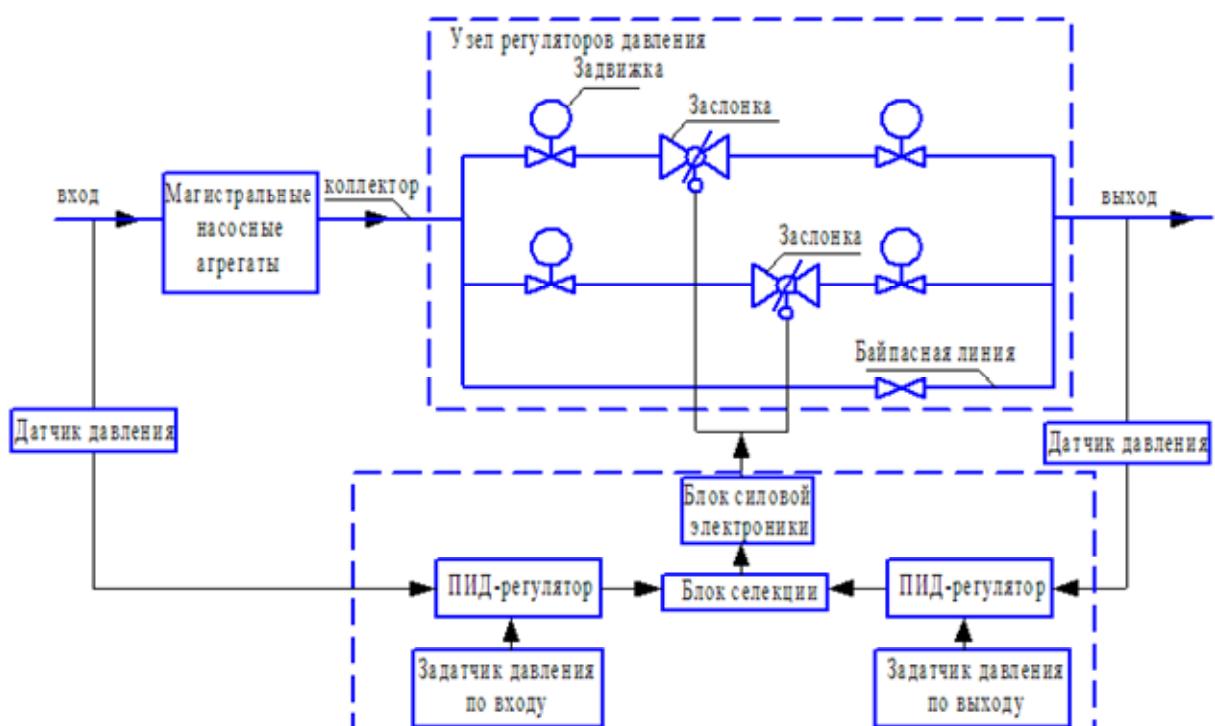


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования давлений в насосной

Регулирование подачи и давления насосов на насосных станциях осуществляется путем дросселирования потока нефти при помощи регулирующего органа на выходе из насосной установки.

Комплекс АСР функционирует в режиме релейного управления и по принципу пропорционально-интегрально-дифференциальной (ПИД) регуляции [3].

Подробнее рассмотрим, как организована система регулирования давления в насосной станции (НПС).

Для преобразования давления на всосе и в нагнетательной линии насосной станции в стандартные токовые сигналы для дистанционной передачи используется специализированный датчик, предназначенный для измерения давления.

В регуляторе давления как для всасывания, так и для нагнетания эти показатели со-поставляются с заданными значениями от задатчиков.

Блок селектирования, работающий по программным алгоритмам, определяет наибольшее из двух сигналов, получаемых от регуляторов. Затем управляющая команда передается в блок силовой электроники, который и осуществляет управление электроприводом регулирующих заслонок.

Выдача сигналов управления на электропривод производится при превышении текущего значения давления на выходе НПС выше значения уставки, или понижения давления на приеме НПС ниже заданного значения [2].

Комплекс АСР позволяет обеспечить быстродействие исполнительных механизмов в пределах от 8 до 60 секунд.

### **Библиографический список**

1. Музипов, Х. Н. Системы управления технологическими процессами добычи, промысловой подготовки и транспорта нефти и газа / Х. Н. Музипов. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 268 с. – ISBN 978-5-507-46261-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/333134> (дата обращения: 28.11.2024). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Агибалова, Н. Н. Технология и установки переработки нефти и газа : учебное пособие для СПО / Н. Н. Агибалова. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 308 с. – ISBN 978-5-507-51521-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/422612> (дата обращения: 28.11.2024). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Гладких Т.Д. Автоматизация технологических процессов в нефтегазовой отрасли: учебное пособие / Т.Д. Гладких. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. - 153 с.

УДК 58.08; ГРНТИ 62.01.85

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МИКРОКОКЛИМАТА ДЛЯ РОСТА ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР**

**С.А. Трифонов, М.В. Ленков**

Rязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, lenkov.m.v@rsreu.ru

**Аннотация.** В статье описывается автоматическая система поддержания оптимального микроклимата для роста овощных культур, представлена структурная схема системы. Разработана теоретическая модель (супервизорной) автоматизированной системы поддержания оптимального микроклимата для применения в условиях выращивания садовых культур.

**Ключевые слова:** оптимальный микроклимат, автоматизированная система регулирования, рост овощных культур

## **AN AUTOMATED SYSTEM FOR MAINTAINING AN OPTIMAL MICROCLIMATE FOR THE GROWTH OF VEGETABLE CROPS**

**S.A. Trifonov, M.V. Lenkov**

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, lenkov.m.v@rsreu.ru

**Abstract.** The article describes an automatic system for maintaining an optimal microclimate for the growth of vegetable crops, and presents a structural diagram of the system. A theoretical model of a (supervisory) automated system for maintaining an optimal microclimate for use in growing garden crops has been developed.

**Keywords:** optimal microclimate, automated control system, vegetable crop growth

## Введение

Контроль микроклимата является одним из ключевых факторов успешного выращивания овощных культур. Оптимальные условия окружающей среды напрямую влияют на рост, развитие и урожайность растений. В условиях современного сельского хозяйства, когда множество садоводов занимаются выращиванием овощных культур в домашних условиях крайне важно вовремя определить, что и в каких количествах необходимо внести для комфортного роста овощных культур.

Цель статьи: Разработка и описание автоматизированной системы поддержания оптимального микроклимата для роста овощных культур.

Задачи:

- Анализ требований к микроклимату для овощных культур.
- Разработка архитектуры системы.
- Теоретический анализ работы системы и теоретическое получение результатов работы системы.

## Аналоги проектируемой системы

Для поддержания оптимального микроклимата в основном применяются 2 вида систем: гидропонные и автоматические системы климат-контроля. Накоплены обширные данные, свидетельствующие о влиянии климатических условий на количество и качество урожая. При использовании парника или иной системы поддержания микроклимата с 1 м<sup>2</sup> таких сооружений можно получать 140–300 кг овощей в год. При выращивании растений в зимне-весенний период приходится искусственно поддерживать микроклиматические условия, влияющие на рост и развитие растений. В связи с этим большое значение приобретают автоматические системы регулирования этих факторов. В настоящее время садоводы перенимают опыт крупных тепличных производств и начинают использовать системы автоматизированного управления, но более простые и дешёвые аналоги. Необходимость автоматизации этих условий обусловлена трудоёмкостью их поддержания в условиях домашнего и дачного выращивания овощей.

Проведем анализ наиболее популярных систем поддержания параметров окружающей среды для парниковых комплексов.

1. Климат-контроль от фирмы Growell. Структурная схема установки представлена на рисунке 1.

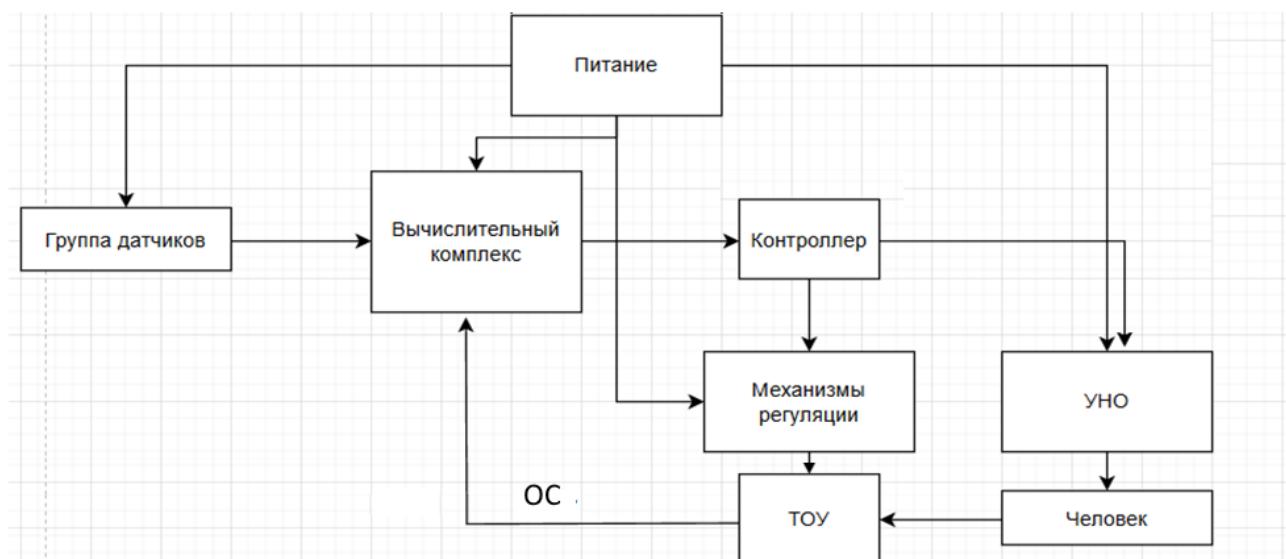


Рис. 1. Структурная схема климат-контроля от фирмы Growell: УНО – устройство наглядного отображения; ТОУ – технологический объект управления; ОС – обратная связь

Данная система представляет собой набор технических средств для сбора данных и поддержания некоторых микроклиматических условий. В ассортименте Growell достаточно товаров для подбора измерительных средств и средств автоматизации для конкретных условий. Но несмотря на явные преимущества, такие как доступность и понятный рядовому потребителю интерфейс, существует ряд особенностей, которые могут не понравиться целевой аудитории. К примеру, поддерживать влажность воздуха можно автоматически достаточно с небольшими тратами, а вот для остальных параметров придётся нести затраты и самому собирать, и настраивать систему [1].

Схема имеет довольно понятный и практичный вид, но усложнена наличием обратной связи и набором технических средств, которые не нужны рядовому потребителю.

Проведём анализ ещё одного вида систем – это гидропонные системы, которые имеют ряд плюсов [2]:

1. Для контроля развития растений потребитель сам создаёт свою экосистему, которая не зависит от погоды, климата, почвы.
2. Грунт не нужен – вместо него простейший субстрат.
3. Автономность и простой уход за растениями – необходимо только поддерживать условия для роста и развития растений.
4. Быстрый рост и высокая урожайность растений.
5. Никаких вредителей и, соответственно, химических обработок.
6. Круглогодичный сбор урожая.

2. Рассмотрим системы Gidropnika 24. Структурная схема установки представлена на рисунке 2.

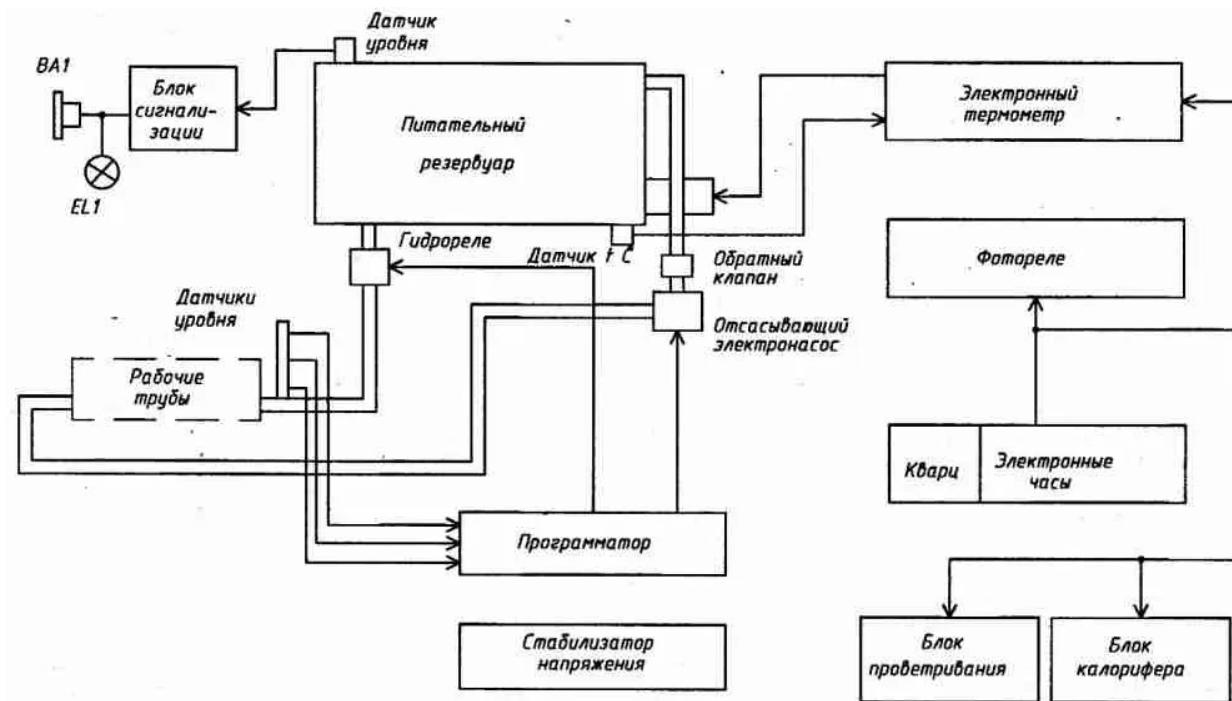


Рис. 2. Структурная схема гидропонной системы Gidropnika 24

Несмотря на явные плюсы, такие как, большой выбор недорогих систем и малые трудозатраты существуют свои особенности у гидропонных систем: сложная установка и настройка, режимы работы Gidropnika 24 подходят не для всех растений, зависимость от электричества, быстрое распространение болезней у растений и как следствие - снижение урожайности [4].

Схема имеет довольно сложный и не понятный вид для рядового потребителя, что в свою очередь отягощает обслуживание ремонт и модернизацию.

### Структурная модель проектируемой системы поддержания микроклимата

Рассмотренные аналоги установок поддержания микроклимата для роста растений и их особенности послужили прототипами создания новой, предлагаемой системы.

Проектируемая автоматизированная система поддержания микроклимата представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, которые:

- выполняют сбор данных с помощью датчиков;
- анализируют данные и на их основе генерируют алгоритм действий для поддержания оптимальных условий.

Данная система представляет собой датчики, которые собирают данные о состоянии системы, PID регулятора [3], обеспечивающего скорость и точность работы, а также из устройства наглядного отображения и системы формирования алгоритма дальнейших действий для формирования и поддержания оптимального климата.

Представленная система на рисунке 3 компенсирует все недостатки представленных ранее систем. Она увеличивает урожайность, снижает трудозатраты, имеет интуитивно понятное устройство и невысокую цену.

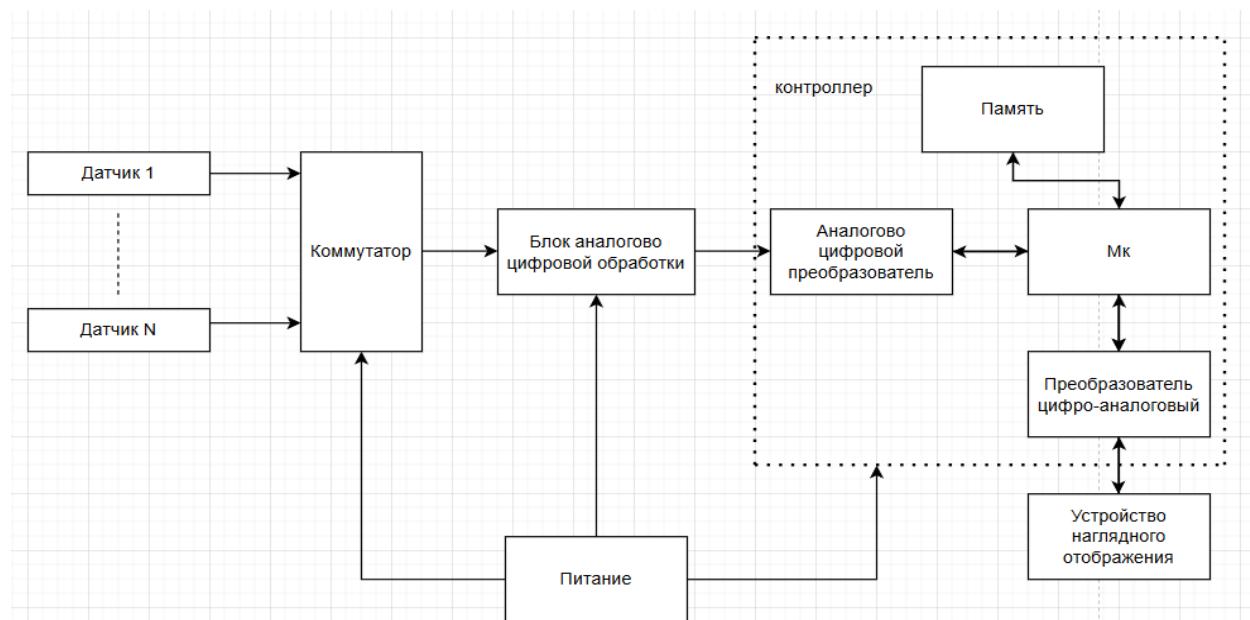


Рис. 3. Структурная схема проектируемой системы поддержания микроклимата для роста растений

Схема имеет понятный вид и не отягощена лишними элементами. Такое решение позволяет выбрать оптимальный алгоритм контроля и управления параметрами микроклимата окружающей среды.

### Выводы

В статье представлена теоретическая модель автоматизированной системы поддержания оптимального микроклимата для выращивания овощных культур. Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Анализ требований к микроклимату:
  - определены ключевые параметры микроклимата, необходимые для роста овощных культур;

- проведён анализ оптимальных значений этих параметров для различных стадий развития растений (прорастание, вегетативный рост, цветение, плодоношение).

### 2. Разработка архитектуры системы:

- предложена структура автоматизированной системы, включающая датчики, исполнительные устройства, микроконтроллеры и программное обеспечение;

- разработаны алгоритмы управления, основанные на принципах обратной связи и адаптивного контроля.

### 3. Теоретическое обоснование эффективности системы:

- показано, что автоматизация контроля микроклимата позволяет поддерживать параметры в оптимальном диапазоне, что способствует увеличению урожайности на 20–30%;

- обоснована энергоэффективность системы за счёт использования современных технологий (ИОТ, светодиодные фотолампы, энергосберегающие устройства).

### 4. Рекомендации для дальнейших исследований:

- проведение экспериментальных испытаний для проверки эффективности системы;

- исследование влияния системы на качество продукции (содержание витаминов, вкусовые свойства);

- разработка мобильного приложения для удалённого управления системой.

## Заключение

Теоретическая разработка автоматизированной системы поддержания оптимального микроклимата показала её высокую эффективность и перспективность для применения в сельском хозяйстве. Внедрение такой системы позволит не только повысить урожайность и качество овощных культур, но и снизить затраты на электроэнергию и трудовые ресурсы. Дальнейшие исследования и практические испытания помогут уточнить параметры системы и адаптировать её для различных условий выращивания.

## Библиографический список

1. Шутов, Д. О. Система управления микроклиматом при акклиматизации растений / Д. О. Шутов // Информационные системы и технологии : сборник статей 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 17–21 апреля 2023 г. / Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники ; редкол.: А. И. Парамонов [и др.]. – Минск, 2023. – С. 76–79.
2. Бондарева, О. Б. Устройство теплиц и парников: Конструкции устройств обогрева, вентиляции и полива в индивидуальных теплицах / О. Б. Бондарева. – Москва: АСТ, 2006. – 96 с.
3. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации / В. В. Денисенко // СТА. – № 4. – Таганрог, 2006. – С. 66 – 74.
4. Шульгина, Л. М. Теплицы и парники: строительство и рекомендации по выращиванию овощей, цветов, грибов / Л. М. Шульгина. – Белгород: Клуб семейного досуга, 2008. – 313 с.

УДК 621.6-52; ГРНТИ 50.47.02

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Н.М. Хлебников, М.В. Ленков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, lenkov.m.v@rsreu.ru

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено применение средств автоматизации на станции перекачки нефти. Представлены методы повышения эффективности применения автоматизированных средств контроля и управления для повышения технологической производительности нефтеперегонных установок.

**Ключевые слова:** нефтеперекачивающая станция, автоматизация, технологический процесс, контроль.

## AUTOMATED CONTROL SYSTEM INSTALLATION OF PUMPING OF PETROLEUM PRODUCTS

N.M. Khlebnikov, M.V. Lenkov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, lenkov.m.v@rsreu.ru

*Abstract.* In this paper, the application of automation tools at an oil pumping station is considered. Methods of increasing the efficiency of the use of automated monitoring and control tools to increase the technological productivity of oil refining plants are presented.

*Keywords:* oil pumping station, automation, technological process, control

### Введение

Автоматизация технологических процессов является одним из решающих факторов повышения производительности и улучшения условий труда. Все существующие и строящиеся промышленные объекты в той или иной степени оснащаются средствами автоматизации. Создание эффективной автоматизированной системы управления технологического процесса является очень сложной задачей.

НПС (нефтеперекачивающие станции) – предназначены для забора нефти из сечения трубопровода с низким напором, увеличения напора с помощью насосов, и ввода нефти в сечение трубопровода с высоким напором. Нефтеперекачивающие станции имеют большую степень автоматизации [2].

Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) установки перекачки нефти (УПН) предназначена для автоматизации технологических процессов УПН, автоматизации деятельности специалистов по контролю и управлению технологическими процессами и производством, а также для своевременного информационного контроля технологического режима работы установки, эффективного и безопасного управления технологическими процессами перекачки нефти.

### Описание установки перекачки нефти

Технологически УПН может состоять из следующих основных блоков:

1. Технологический. Состоит из секции нагрева, секции обессоливания, и секции отбора нефти.

2. Блок регулирования. Работа блока заключается в измерении и регулировании расхода поступающей нефтяной эмульсии.

3. Блок подготовки топлива. Работа блока заключается в очистке топливного газа от механических примесей, капельной жидкости, осушке, редуцировании и поддержке давления газа на заданном уровне на выходе для подачи газа к основным и запальным горелкам и на свечу.

Система выполняет следующий объем функций [3]:

- дистанционный сбор и отображение технологической информации на мнемосхемах;
- автоматический контроль технологических параметров и параметров состояния оборудования;
- автоматическую защиту УПН по аварийным и предельным значениям контролируемых параметров и при отказах систем обеспечения;
- поддержание режимов работы УПН в пределах нормативных условий эксплуатации;
- управление запорной арматурой на технологических трубопроводах;
- программное управление и защиту насосных агрегатов;
- регулирование технологических параметров;
- диагностика состояния системы;
- диагностика состояния каналов связи;
- составление отчетов и сводок;
- документирование информации (архивацию событий нижнего уровня и действий оператора).

## Особенности АСУ ТП

Установки перекачки нефти обладают следующими свойствами:

1. Гибкость. При необходимости система может быть доукомплектована соответствующими модулями и расширениями, позволяющими решать те или иные задачи по автоматизации УПН [1].

2. Совместимость. По требованию заказчика АСУ ТП УПН может быть выполнена на базе любых промышленных контроллеров, это позволяет эксплуатирующей организации сократить номенклатуру ЗИП (запасные части, инструменты и принадлежности), уменьшить затраты на освоение и обслуживание системы.

Функциональная схема АСУ ТП УПН приведена на рисунке 1.

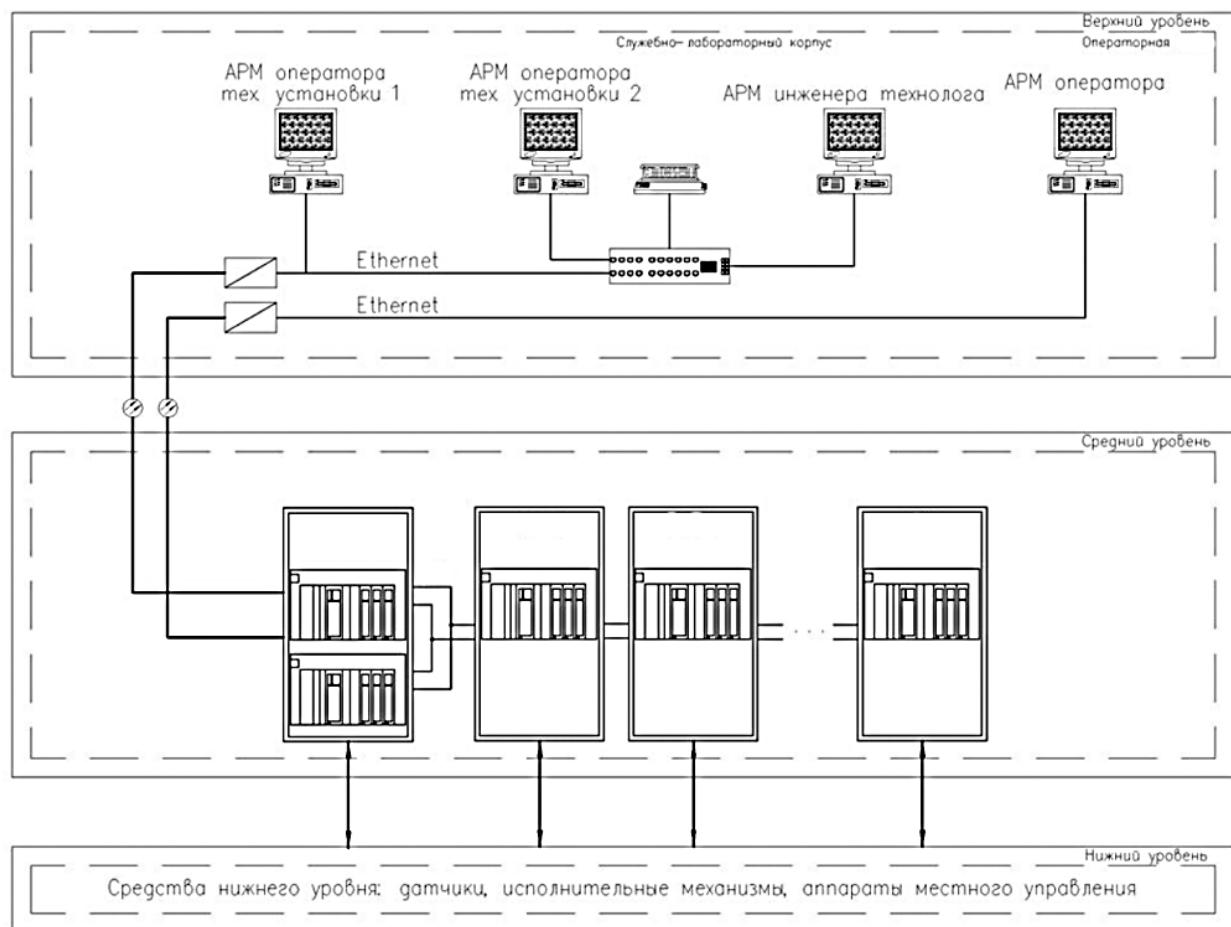


Рис. 1. Функциональная схема АСУ ТП установки перекачки нефти

## Описание системы контроля

Система контроля и управления УПН представляет собой программно-аппаратный комплекс, в котором задачи контроля и управления технологическим процессом и оборудованием решаются на следующих уровнях иерархии [2]:

- нижний уровень - первичные средства автоматизации (датчики, измерительные преобразователи, приборы местного контроля, исполнительные устройства);
- средний уровень - шкафы контроля и управления, обработки информации;
- верхний уровень - информационно-вычислительный комплекс (шкафы АСУТП, АРМ оператора, серверы базы данных);
- каналы и оборудование для передачи информации.

Для УПН предусматриваются следующие технологические операции [1]:

- прием нефти с нефтяных промыслов в резервуарный парк;
- откачка нефти из резервуарного парка и ее закачка в магистральный нефтепровод;
- одновременное осуществление приема и закачки нефти в нефтепровод;
- перекачка нефти через резервуарный парк (для удобства приемо-сдаточных операций);
- перекачка нефти с подключенной емкостью.

При осуществлении любой из перечисленных операций в работе находится резервуарный парк. Основное его назначение выполнение роли буфера между нефтяным промыслом и магистральным нефтепроводом.

Вторая роль резервуарного парка – роль аварийной емкости, в которую принимается нефть, поступающая с промыслов при аварии на ГНПС или магистрали.

Третье назначение резервуарного парка – ёмкость для приема нефти, откачиваемой из поврежденной магистрали. При этом сокращаются аварийные потери нефти и уменьшается экологический ущерб от аварий.

Все что происходит на станции, видит человек-оператор, находящийся в операторной. На пульте оператора отображается вся необходимая информация:

- данные с датчиков;
- состояние системы;
- информация об авариях;
- отчеты о работе агрегатов.

На основе полученных сведений оператор может принимать решения, соответствующие текущей ситуации и изменять или останавливать работу станции.

## **Выводы**

При использовании автоматизации сложных установок по перекачке нефтепродуктов технологические процессы функционируют в условиях оптимальных физических и временных ресурсов, поэтому задачи человека в производственном процессе сводятся к наладке, контролю, регулированию и обслуживанию средств автоматизации.

## **Библиографический список**

1. Музипов, Х. Н. Системы управления технологическими процессами добычи, промысловой подготовки и транспорта нефти и газа / Х. Н. Музипов. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 268 с. — ISBN 978-5-507-46261-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/333134> (дата обращения: 28.11.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Агибалова, Н. Н. Технология и установки переработки нефти и газа : учебное пособие для спо / Н. Н. Агибалова. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 308 с. — ISBN 978-5-507-51521-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/422612> (дата обращения: 28.11.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Гладких Т.Д. Автоматизация технологических процессов в нефтегазовой отрасли: учебное пособие / Т.Д. Гладких. — Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. - 153 с.

УДК 621.9.04; ГРНТИ 55.23.15

## **ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ**

**В.Н. Авилов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, mtjad44@mail.ru*

**Аннотация.** В работе рассматриваются особенности инструментальных сталей после закалки. Также в работе описаны принципы действия специальных методов, которыми обрабатываются закаленные инструментальные стали, их преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** инструментальные стали, обработка после закалки

## MACHINING OF TOOL STEELS AFTER QUENCHING

V.N. Avilov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, mtjad44@mail.ru

*Annotation.* The paper considers the features of tool steels after quenching. The paper also describes the principles of operation of special methods used to process hardened tool steels, their advantages and disadvantages.

*Keywords:* tool steels, machining after quenching

Для изготовления различных инструментов используют такие стали, как: углеродистые стали (У7-У13) для молотков, зубил и простых режущих инструментов; легированные стали (ХВГ, 9ХС) для метчиков, разверток и штампов; быстрорежущие стали (Р6М5, Р18) для сверл, фрез и резцов; штамповые стали (Х12МФ, 5ХНМ) для пресс-форм и пuhanсонов. Предварительно обработанные детали подвергаются термообработке для достижения необходимых параметров. Благодаря высокому содержанию углерода инструментальные стали отлично калятся. Закалка формирует мартенситную структуру, которая обеспечивает высокую твердость (55-67 HRC), что является критически важным для режущего инструмента, штампов, матриц и пресс-форм. Закаленная сталь имеет сопротивление к деформациям при ударных и статических нагрузках, что является важным критерием, например, при извлечении пружин, втулок, осей и подшипниковых узлов.

Однако, после закалки сталь становится хрупкой, поэтому необходимо выполнить отпуск, благодаря этому снижаются внутренние напряжения и сохраняется высокая твердость, но повышается вязкость. Инструменты из закаленной стали меньше подвержены размягчению при нагреве (например, при резании) и пластическим деформациям под давлением. Из-за твердости, полученной после закалки, традиционные методы обработки, такие как точение и фрезерование, плохо справляются с финишной обработкой из-за быстрого износа режущего инструмента (особенно из быстрорежущей стали). Использование твердосплавного также не решает эту проблему, т.к. большинство твердосплавного инструмента имеет твердость 40-50 HRC, что говорит о том, что при обработке изделия инструмент будет изнашиваться быстрее, чем проходит обработка, что, в свою очередь, увеличивает период изготавления и его стоимость. Также для обработки твердых сталей требуются большие усилия, что приводит к вибрациям, снижению точности, риску образования трещин и деформациям заготовки или станка ввиду перегрева. Поэтому используются специальные методы обработки: шлифование или электроэрозия.

### Особенности инструментальных сталей после закалки

Основными целями закалки являются повышение твердости, повышение прочностных характеристик, а также снижение пластичности до допустимых величин.

Закалка стали происходит по следующему принципу: предварительно обработанную с припуском заготовку нагревают до температур, при которых осуществляется изменение структурного состояния металла, выдерживают в печи при температуре, установленной в технологической карте, а затем охлаждают со скоростью, которая обеспечивает формирование необходимой кристаллической структуры.

Основной проблемой обработки инструментальной стали является хрупкость металла, приобретаемая после термической обработки. После закалки практически все инструментальные стали приобретают повышенную хрупкость из-за образования мартенсита, однако, степень хрупкости различается в зависимости от состава и условий обработки.

Так, например, инструментальные углеродистые стали, такие как У7-У13(0,7-1,3% углерода), имеющие хорошую обрабатываемость в состоянии до закалки, после закалки приобретают мартенситную структуру и прочность 58-64 HRC. Эти стали имеют низкую тепло-

проводность и в закаленном состоянии подвержены риску растрескивания ввиду приобретаемой в процессе термообработки высокой хрупкости, что делает обработку данных сталей традиционными методами невозможной из-за перегрева и ударных нагрузок.

Бысторежущие стали (Р18, Р6М5К5) из-за высокого содержания карбидов вольфрама и ванадия (вплоть до 25%) и наличия крупных первичных карбидов также приобретают низкую теплопроводность, что ведет к ухудшению обрабатываемости. При обработке фрезерованием или точением этих сталей возможны выкрашивания режущих кромок инструмента ввиду прочности стали, появление трещин и деформаций из-за ударных нагрузок.

### **Обработка инструментальных сталей после закалки**

#### **Шлифование**

Основным методом чистовой обработки закаленных инструментальных сталей является шлифование.

Преимущества:

1. Благодаря абразивному инструменту достигается высокая чистота поверхности ( $R_a 0,1\text{--}0,4 \mu\text{м}$ ), что является важным параметром при изготовлении инструмента.

2. Также шлифование позволяет выдержать допуски до 2-5  $\mu\text{м}$ , что критично для измерительного или прецизионного инструмента.

3. При обработке методом шлифования используется СОЖ, например масло или эмульсия, что снижает риск перегрева и отпуска.

4. Скорость съема материала выше, чем у электроэрозии. Так, например, шлифование вала, в среднем, занимает в 5 раз меньше времени, чем электроэрозионная вырезка аналогичного профиля.

Недостатки:

1. Шлифование эффективно только для поверхностного съема материала. Данным методом не представляется возможным обрабатывать пазы или отверстия большой глубины.

2. При неправильной обработке возможны термические прижоги (перегрев поверхности) и появление трещин из-за остаточных напряжений.

3. Быстрый износ инструмента при изготовлении инструмента из твердых сплавов.

4. Невозможность обработки сложных 3D-поверхностей.

В случаях, когда механическая обработка является невозможной, в основном, при выполнении сложных контуров штампов и пресс-форм, используют электроэрозионную обработку (ЭЭО).

#### **Электроэрозионная обработка**

Метод электроэрозионной обработки основан на свойстве поверхностных слоев материалов разрушаться под воздействием коротких (до 0,01 сек.) электрических разрядов в жидкой диэлектрической среде. По мере сближения электрода-инструмента и электрода-заготовки напряженность  $E$  электрического поля возрастает обратно пропорционально межэлектродному зазору  $S$ :  $E = \frac{U}{S}$ , где  $U$  – разность потенциалов инструмента и заготовки.

Наибольшая напряженность возникает в месте минимального межэлектродного зазора. Из этого следует то, что на точность обработки влияет качество поверхности электрода-инструмента и электрода-заготовки. При достижении некоторого минимального  $S$  пробоя образуется электрический разряд, в результате чего на поверхности материала образуется сферическая лунка. Под воздействием серии разрядов поверхность приобретает кратерообразный вид.

Под действием электрического поля, образованного в межэлектродном пространстве, электроны переходят с отрицательно заряженного электрода-инструмента на положительно заряженный электрод-заготовку, что вызывает нагрев поверхности заготовки с последующим ее плавлением и испарением, благодаря чему образуется газовый пузырь. В это время в направлении, обратном направлению движения электронов, перемещаются ионы. Как известно, масса ионов значительно превышает массу электрона. Благодаря этому большинство ионов,

при электроискровом методе обработки, не успевают достичь электрода-инструмента и нагреть его. Таким образом, съем материала происходит преимущественно с анода, которым служит электрод-заготовка.

### Основные методы электроэрозионной обработки

*Прошивная электроэрозионная обработка* основана на принципе применения искрового разряда между электродом инструмента и заготовкой в диэлектрической жидкости. Данный метод применяется для выполнения глухих занижений различной формы, например, для изготовления матриц и пuhanсонов сложных пресс-форм. Недостатком данного метода является износ электрода-инструмента ( $\sim 1$  электрод на 2-3 заготовки), что означает дополнительные затраты на изготовление инструмента для изготовления крупных партий продукта.

*Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка* основана на принципе резания металла тонкой проволокой ( $\varnothing 0,02\text{-}0,3$  мм) по программе ЧПУ. Наличие системы ЧПУ позволяет обрабатывать самые сложные контуры. Некоторые проволочно-вырезные станки, например AgieCharmilles FORM E 350, имеют возможность задания траектории движения фильтер независимо друг от друга, что позволяет изготавливать сложные прецизионные детали. Данным методом изготавливают штампы и пресс-формы, прецизионные контурные детали и профильные пазы.

*Анодно-механическая обработка* (АМО) основана на комбинации электрохимического растворения и механического съема материала. Данный метод применяют для изготовления режущего инструмента (фрезы и сверла), доводки поверхностей и обработки кромок. Данный метод ЭЭО не имеет термического влияния на изделие и позволяет обрабатывать хрупкие материалы. К минусам данного метода можно отнести низкую производительность.

*Микроэлектроэрозионная обработка* применяется для изготовления микросвёрл ( $\varnothing 0,05\text{-}0,5$  мм) и выполнения микроотверстий в микроэлектронике, для изготовления медицинских инструментов, граверов и штампов. Данный метод ЭЭО позволяет достигать самых высоких точностей размеров ( $\pm 1$  мкм) и точности поверхности ( $Ra 0,1\text{-}0,4$  мкм).

### Сравнение электроэрозионной и шлифовальной обработок

Каждый из описанных выше специальных методов обработки имеет свои плюсы и недостатки, поэтому каждый из них применяется в определенных случаях. Например, из принципа действия ЭЭО можно понять, что данным методом обрабатываются только электропроводящие материалы (металлы, сплавы, графит и т.д.), в то же время шлифовальная обработка не требует от материала возможности проводить электрический ток, что дает возможность обрабатывать с ее помощью любые материалы, прочность которых не превышает 67 HRC.

Несмотря на то, что скорость обработки шлифовальным методом в 3-5 раз превышает скорость ЭЭО, в изготовлении штампов и пресс-форм чаще применяется электроэрозионная обработка, т.к. максимальная сложность геометрии, обрабатываемой шлифовальным методом, ограничена геометрией шлифовального круга. В отличии от шлифовальной обработки, электроэрозионная позволяет обрабатывать слои материала с большой толщиной, что помогает свести к минимуму предварительную обработку заготовки. Большинство электроэрозионных станков оснащены автоматическими магазинами или автозаправщиками проволоки (в зависимости от типа станка), что позволяет автоматизировать процесс и выполнять в одной программе не только контуры и занизжения, но и отверстия с высокой точностью.

### Библиографический список

1. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979.
3. ГОСТ 5950-2000. Стали инструментальные легированные. Технические условия.
4. Петров Ю.Н. "Электроэрозионная обработка закаленных сталей" // Вестник машиностроения. – 2018. – №5. – С. 45-50.

## СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ»

УДК 615.847.8; ГРНТИ 76.13.19

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ПОЛЕФОРМИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МАГНИТОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.Б. Каплан

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru*

**Аннотация.** В работе рассмотрен вариант описания полеформирующего элемента в виде вектора параметров, выделены структурные единицы ячейка и сегмент многоэлементной полеформирующей системы магнитотерапевтического аппарата. Показана взаимосвязь систем координат каждого уровня декомпозиции модели полеформирующей системы. Создано программное обеспечение для моделирования магнитных полей, поддерживающее ввод исходных данных, ориентированный на конструктивную реализацию многоэлементной полеформирующей системы. Построена визуальная модель реконфигурируемой полеформирующей системы магнитотерапевтического аппарата.

**Ключевые слова:** полеформирующая система, индуктор-электромагнит, магнитотерапевтический аппарат, моделирование магнитного поля.

### PRESENTATION OF A MULTI-ELEMENT FIELD-FORMING SYSTEM OF A MAGNETOTHERAPEUTIC APPARATUS

M.B. Kaplan

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru*

**The summary.** The paper considers a variant of describing a field-forming element as a parameter vector, identifies structural units of a cell and a segment of a multi-element field-forming system of a magnetotherapeutic device. The relationship of coordinate systems of each level of decomposition of the field-forming system model is shown. Software for modeling magnetic fields is created, supporting the input of initial data, focused on the constructive implementation of a multi-element field-forming system. A visual model of a reconfigurable field-forming system of a magnetotherapeutic device is built.

**Keywords:** field-forming system, inductor-electromagnet, magnetotherapeutic apparatus, magnetic field modeling.

Современный магнитотерапевтический аппарат (МТА), как правило, оснащен многоэлементной полеформирующей системой (ПФС), благодаря которой достигается возможность генерации сложно распределенных в пространстве и во времени магнитных полей [1]. Потенциальное многообразие формируемых полей многоэлементной системы обеспечивает создание индивидуально ориентированных конфигураций, применимых для лечения конкретного пациента с учетом особенностей требуемого физиотерапевтического воздействия, что является первостепенной задачей в разработках систем медицинского назначения [2].

В качестве отдельного элемента ПФС чаще всего выступает индуктор-электромагнит. Пространственное распределение поля определяется его формой, положением и ориентацией относительно области воздействия. Величина магнитного поля в точке пространства, а также характер изменения поля во времени регулируются за счет управляющего тока, протекающего через обмотку индуктора. Результирующее поле определяется в соответствии с принципом суперпозиций полей отдельных элементов ПФС. В связи с чем, в задачах моделирования и расчета магнитного поля, многоэлементная ПФС может быть представлена совокупностью векторов [3], содержащих параметры индуктора-электромагнита.

Для описания индуктора-электромагнита, предлагается использовать следующий модифицированный вектор входных параметров, достаточной размерности, полностью характеризующий полеформирующий элемент в расчетах магнитного поля ПФС МТА:

$$V = (loc, type, ch)$$

где  $loc = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)$  – вектор местоположения, определяющий пространственное расположение элемента;

$x_c, y_c, z_c$  – координаты центра в декартовой системе координат;

$\alpha, \beta, \gamma$  – углы Эйлера, задающие ориентацию осей элемента;

$type = (a, b, l, w, \mu_{cep\partial})$  – вектор, характеризующий тип конструкции индуктора;

$a, b, l$  – габаритные размеры;

$w$  – число витков;

$\mu_{cep\partial}$  – магнитная проницаемость сердечника;

$ch$  – параметр, определяющий принадлежность индуктора к каналу.

Для совокупности индукторов входящих в состав одного канала, используется один и тот же управляющий сигнал, в качестве которого выступает ток, протекающий по обмоткам индукторов. Предложенный вектор входных параметров может быть также применим для описания реконфигурируемых систем, для которых характерна возможность изменения количества, взаиморасположения полеформирующих элементов, перестройка состава каналов воздействия, в том числе в ходе выполнения физиотерапевтической процедуры.

Для расчета распределения магнитного поля необходимо знать местоположение индукторов в исходной системе координат расчетной области, однако в рамках многоэлементных ПФС в качестве исходных данных удобно использовать дополнительные системы координат, задаваемые в рамках отдельной группы или групп электромагнитов. В свою очередь местоположение и пространственная ориентация отдельной группы рекомендуется описать в наиболее предпочтительной с точки зрения сложности расчета или конструктивного решения системе координат.

В рамках декомпозиции функциональной модели [4] многоэлементной ПФС МТА выделены группы полеформирующих элементов типа ячейка и сегмент. Тогда в рамках решения задачи расчета распределения магнитного поля, формируемого многоэлементной ПФС МТА, предлагается использовать следующие системы координат и векторы, задающие местоположение полеформирующего элемента:

- местоположение индуктора в системе координат ячейки  $S2$  определяется вектором  $loc_{инд} = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)_{S2}$ ;
- местоположение ячейки в системе координат сегмента  $S3$  определяется вектором  $loc_{яч} = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)_{S3}$ ;
- местоположение сегмента в системе координат исходной расчетной области  $S1$  определяется вектором  $loc_{сег} = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)_{S1}$ ;
- местоположение индуктора в системе координат исходной расчетной области  $S1$  определяется вектором  $loc_{инд} = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)_{S1}$ ;
- местоположение индуктора в системе координат индуктора  $S0$  определяется вектором  $loc_{инд} = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)_{S0}$ .

Особенностью системы координат  $S0$  является равенство нулю всех составляющих вектора  $loc_{инд}$ , что позволяет снизить сложность вычисления магнитного поля, создаваемого отдельным индуктором. Выделение уровней декомпозиции ячейка и сегмент в исходной модели ПФС МТА предпочтителен при вводе исходных данных в моделировании реальных МТА, где указанные структурные единицы являются конструктивными элементами устройства. Тогда основными этапами расчета магнитного поля многоэлементной ПФС являются:

расчет магнитных полей каждого индуктора и сложение вычисленных распределений в соответствии с принципом суперпозиций. В свою очередь моделирование магнитного поля отдельного индуктора, местоположение которого задано в исходной системе координат расчетной области  $S1$ , предполагает преобразование координат точки расчетной области из  $S1$  в  $S0$

$$p_{S0} = M p_{S1},$$

где  $p_{S1} = (x, y, z, 1)_{S1}^T$ ,  $p_{S0} = (x, y, z, 1)_{S0}^T$  – векторы координат точки, заданные в системе координат  $S1$  и  $S0$  соответственно, а  $M$  – матрица преобразования координат.

Переход выполняется на основе матриц поворота и сдвига. Если в исходных данных положение индуктора представлено в виде вектора  $loc_{ИНД} = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)_{S1}$ , то переход от системы координат  $S0$  к системе координат  $S1$  осуществляется за счет матрицы  $M01$ , с использованием, например, углов, характеризующих крен, тангаж, рысканье [5]:

$$M01 =$$

$$\begin{pmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma)-\sin(\alpha)\cos(\gamma) & \sin(\alpha)\sin(\gamma)+\cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & x_c \\ \sin(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\cos(\gamma)+\sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma)-\cos(\alpha)\sin(\gamma) & y_c \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\beta)\cos(\gamma) & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В случае, когда электромагниты конструктивно сгруппированы в ячейки, а ячейки объединены в сегменты, переход от системы координат  $S0$  к системе координат  $S1$  производится с помощью следующей матрицы

$$M = M31(loc_{СЕГ}) M23(loc_{ЯЧ}) M02(loc_{ИНД}) = (m_{i,j})_{i=1,4; j=1,4},$$

где  $M02$  – матрицы перехода из системы координат индуктора в систему координат ячейки;

$M23$  – матрицы перехода из системы координат ячейки в систему координат сегмента;

$M31$  – матрицы перехода из системы координат сегмента в систему координат исходной расчетной области.

Здесь следует помнить, что порядок элементов в указанном произведении не должен меняться, так как результат определяется в соответствии с правилами перемножения матриц.

Для преобразования координат точки расчетной области при переходе из системы координат  $S1$  к системе координат  $S0$  необходимо выполнить две операции: сдвиг, например, путем вычитания координат вектора смещения  $V_{CM} = (m_{i,j})_{i=1,3; j=4}$  из координат исходной точки, а также поворот, путем умножение транспонированной субматрицы  $M_S = (m_{i,j})_{i=1,3; j=1,3}^T$ .

Предлагаемый подход к представлению многоэлементной ПФС МТС реализован в программе моделирования магнитных полей реконфигурируемых ПФС [6]. Программа использовалась для решения задач моделирования магнитных полей МТА «RelaxMAG». Для указанного устройства отдельная ячейка представляет собой конструкцию, включающую четыре индуктора, расположенные в одной плоскости (рисунок 1), а также блок управления, формирующий индивидуальные сигналы для каждого индуктора и выполняющий функции синхронизации, контроля и связи с головным блоком управления аппарата.

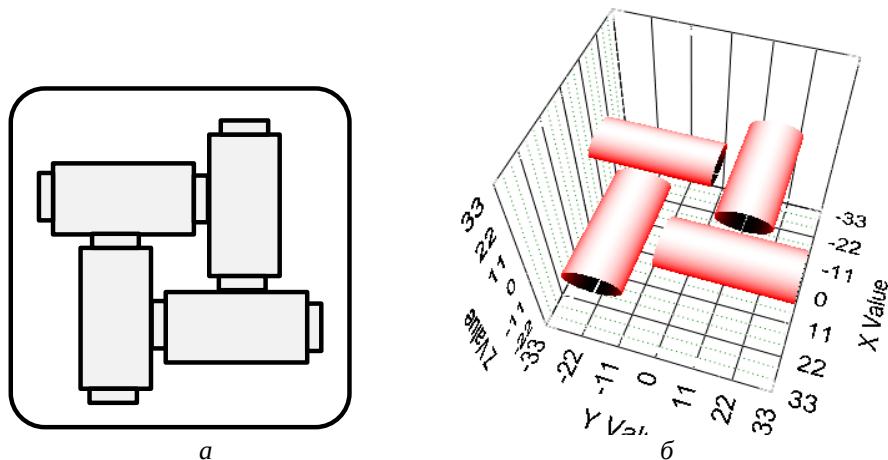


Рис.1. Вариант схемы расположения индукторов в ячейке: а – схема расположения; б – модель конструкции

В свою очередь ПФС аппарата состоит из трех сегментов, каждый из которых представляет собой матрицу  $4 \times 5$  ячеек (рисунок 2). Ячейки отдельного сегмента жестко закреплены на едином каркасе. Конструкция аппарата, позволяет изменять положение крайних сегментов (сегмент № 1 и № 3) относительного центрального сегмента (сегмент № 2).

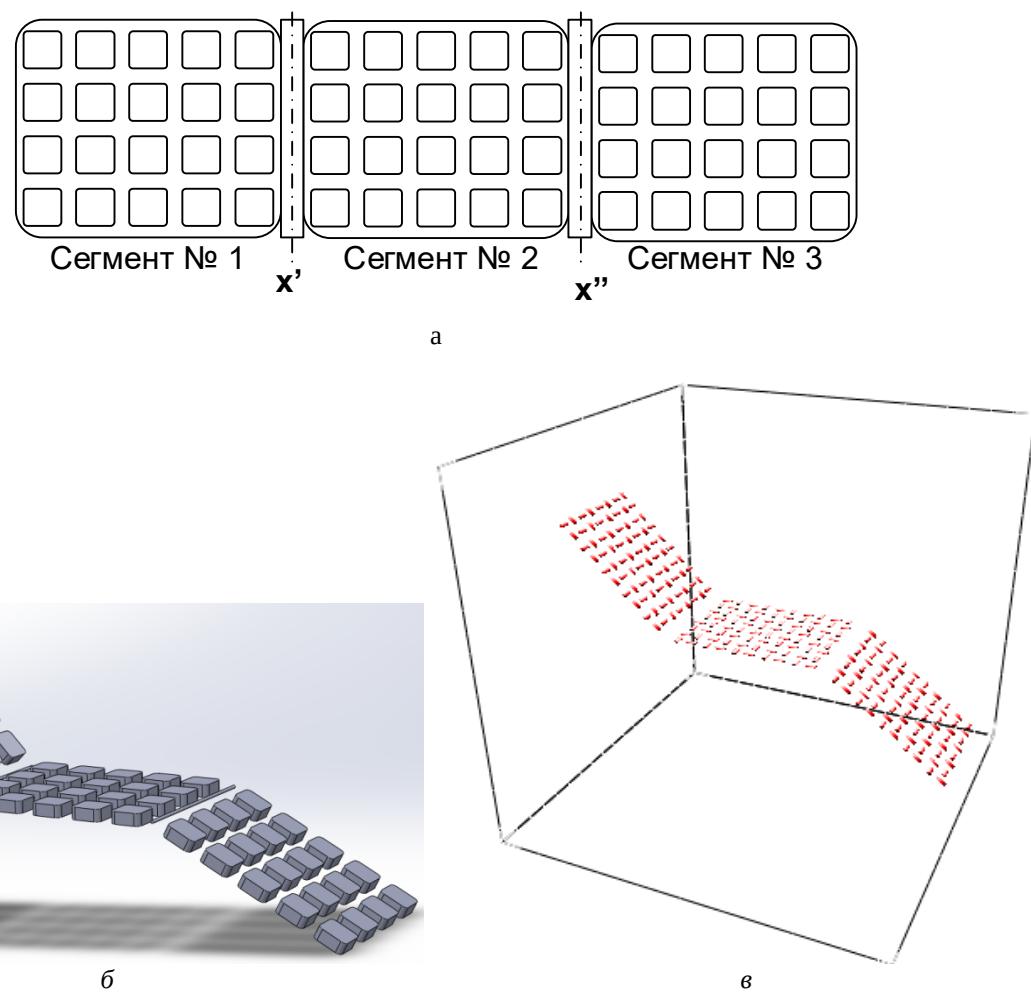


Рис. 2. Вариант схемы расположения сегментов, объединяющих ячейки с индукторами:  
а – схема расположения; б – модель конструкции в виде ячеек;  
в – модель конструкции в виде индукторов-электромагнитов

Изменение положения выполняется вокруг оси  $x'$ , для сегмента № 1, и вокруг оси  $x''$  для сегмента № 3 в диапазоне от 0 до 90 градусов. Перед проведением лечебной процедуры положение сегментов подбирается индивидуально для каждого пациента, обеспечивая комфортное размещения человека, что приводит к изменениям пространственных координат индукторов и их взаимоориентации. Указанный факт требует выполнить коррекцию исходных значений управляющих сигналов для формирования распределений магнитных полей с заданными характеристиками. Коррекция выполняется на основе сравнения распределений магнитных полей, рассчитанных для ПФС, отличающихся положением сегментов и, следовательно, взаиморасположением индукторов.

Таким образом, предложен и реализован подход описания для задач расчетам магнитных полей реальных многоэлементных ПФС МТА, обладающих сложноориентированным пространственным размещением индукторов-электромагнитов, конструктивно упорядоченных в виде ячеек и сегментов.

### **Библиографический список**

1. Гуржин С.Г., Жулев В.И., Каплан М.Б., и др. Этапы развития систем комплексной хрономагнитотерапии // Вестник РГРТУ, № 60, 2017. – С. 184-194.
2. Саморукова О.Д., Крошилин А.В., Крошилина С.В., Жулева С.Ю. Задачи разработки систем медицинского назначения при выборе схемы медикаментозного лечения // Вестник РГРТУ, № 88, 2024. – С. 106-114.
3. Сотников А.А. Теоретические принципы и методика моделирования сигналов информационно-управляющих систем // Вестник РГРТУ, № 90, 2024. – С. 121-132.
4. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В. и др. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем // Вестник РГРТУ, № 89, 2024. – С. 85-93.
5. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № RU 2024690679. Программа моделирования магнитных полей реконфигурируемой полеформирующих систем: № 2024688895: заявл. 28.11.2024: опубликовано 17.12.2024, Бюл. № 2 / М.Б. Каплан; заявитель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

УДК 615.847.8; ГРНТИ 76.13.19

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ МАГНИТОТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**А.С. Тогулов, М.Б. Каплан**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, togulov.a.s@rsreu.ru*

**Аннотация.** В работе рассматриваются информационно-измерительные системы сбора и хранения данных. Приводится алгоритм сбора данных с измерительных преобразователей и некоторая структура единой базы данных, размещённой на сервере. Рассматривается первичный анализ количества, способов подключения, разновидностей вариаций всевозможного использования трёхосевых электромагнитных компонентов магнитотерапевтического аппарата. Рассматривается один из способов подключения и ведения рассмотренной базы данных, с приведением структуры данного подключения и рассмотрения работы протоколов обращения к ней. Данна сравнительная характеристика возможных иных решений.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, система сбора данных, способ хранения данных компонента, способ ведения информационной базы данных, вариация сборки магнитотерапевтического аппарата, аналитика ведения контроля параметров, пример системы контроля.

## INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF CONTROL OF PARAMETERS OF COMPONENTS OF MAGNETOTHERAPEUTIC DEVICES

A.S. Togulov, M.B. Kaplan

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, togulov.a.s@rsreu.ru

*The summary.* The paper deals with information-measuring systems of data collection and storage. The algorithm of data collection from measuring transducers and some structure of the unified database placed on the server are given. An initial analysis of the number, connection methods, variations of variations of all possible uses of three-axis electromagnetic components of a magnetotherapy apparatus is considered. One of the ways of connection and maintenance of the considered database is considered, with giving the structure of the given connection and consideration of work of protocols of reference to it. A comparative characterization of possible other solutions is given.

*Keywords:* an information and measurement system, a data acquisition system, a method of storing component data, a method of maintaining an information database, a variation of an assembly of a magnetotherapy device, analytics for maintaining parameter control, and an example of a control system.

Основной задачей физиотерапии является достижение высокой эффективности в лечении пациента. При магнитотерапии сложность решения связана с формированием магнитного поля, биотропные параметры которого должны быть заданы с учетом особенностей заболевания конкретного пациента. В дальнейшем на качество лечения существенно влияет точность формирования требуемого распределения магнитного поля в пространстве и времени [1]. В этом случае определяющими факторами выступают параметры полеформирующей системы магнитотерапевтического аппарата (МТА).

Типовой состав полеформирующей системы образован индукторами-электромагнитами, тип, количество и пространственное взаиморасположение которых связаны либо с конструктивными особенностями изготовления МТА, либо с требованиями, по формированию магнитного поля заданной конфигурации. Характерной особенностью МТА комплексного воздействия является большое количество однотипных полеформирующих элементов, число которых может достигать нескольких сотен штук. В этом случае контроль параметров индукторов-электромагнитов при серийном изготовлении МТА предполагает использование специализированной информационно-измерительной системы (ИИС) [2].

Текущая работа посвящена разработке варианта комплекса измерительных и вычислительных средств контроля индукторов-электромагнитов для МТА. Кроме того, обязательными требованиями, предъявляемыми к системе, являются автоматизированный режим работы, представление результатов измерения и контроля в виде единой систем данных, а также хранение сведений об исполнителях, выполняющих работы по сборке и тестированию как отдельных компонентов, так и МТА в целом.

Выделены основные компоненты, влияющие и определяющие структуру ИИС контроля:

- индуктор-электромагнит – формирователь поля, выполняющий преобразование управляющего тока в магнитное поле. Конструктивно выполненный в виде соленоида с сердечником;
- датчик магнитного поля – первичный преобразователь магнитного поля в электрический сигнал, который может быть представлен как в виде трехосевого преобразователя Холла, так и в виде катушки индуктивности;
- блок анализа и управления – компонент системы, выполняющий функции как управления электромагнитом, сбора данных с датчиков, обработки и передачи. На современном этапе реализация может быть выполнена на базе микроконтроллера, ПЛИС, специализированных плат сбора данных.

С учетом указанных компонентов, построена структура ИИС (рисунок 1), дополнительно содержащая блок питания и силовой источник тока. Кроме того, блок анализа и

управления представлен тремя составляющими: персональным компьютером, микроконтроллером и устройством сбора данных, который в свою очередь оснащен датчиками магнитного поля.

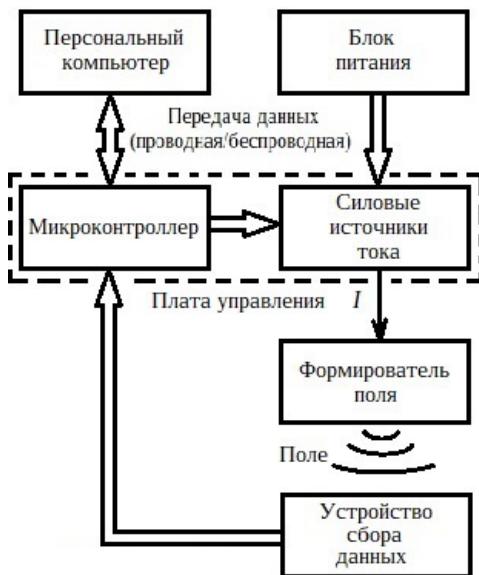


Рис. 1. Вариация структурной схемы включения измерительной системы

Основными этапами работы ИИС контроля параметров компонентов МТА, являются:

- подготовка данных, выбор измерительных схем и методик, определения требуемого комплекса испытаний, ввод данных об исполнителях;
- измерение и проверка соответствия значений контролируемых параметров, в том числе получение тестовых распределений магнитного поля;
- анализ распределения поля в пространстве области контроля, с целью выявления пространственных зон с критическим отклонением величины магнитной индукции;
- корректировка – расчет корректирующих коэффициентов для управляющих сигналов, подаваемых на обмотку конкретного индуктора-электромагнита с учетом его реального расположения в составе МТА, для получения в дальнейшем заданного распределения магнитного поля;
- маркировка, присвоение идентификатора и формирование конфигурационных данных, которые на следующих этапах цикла производства МТА будут использованы в настройках.

Для оценки распределения магнитного поля требуется совокупность датчиков, работа которых должна выполняться синхронно и в автоматизированном режиме. Кроме того, необходимо снизить влияние фонового поля, что предполагает действия по установки нулевых значений. Регистрация пространственного распределения с помощью точечных датчиков может быть проведена либо при использование сеточной структуры размещения [3], либо при контроле поля в особых реперных точках. Второй подход предполагает использование минимального и при этом достаточного количества датчиков. В этом случае факторами, влияющими на число датчиков, будут выступать:

- размер области терапевтического воздействия, определяемый тестируемым индуктором-электромагнитом;
- локальная пространственная точность формирования магнитного поля;
- частотно-временна характеристика поля.

Классической проблемой является стремление повысить пространственное разрешение и точность за счет увеличения количества датчиков и желание уменьшить сложность ор-

ганизации стоимости ИИС за счет снижение количества первичных преобразователей. Отдельной проблемой при построении подсистемы измерения магнитного поля является сложность обеспечения заданной взаимоориентации датчиков. В качестве возможных вариантов следует выделить конструкцию с механическими фиксаторами датчиков, либо применение оптического и магнитного выравнивания положения датчика при тестовом контроле поля индуктора заданного типа. Минимальное количество датчиков для типового индуктора-электромагнита МТА серии «Мультимаг» определено равным трем.

Результаты измерения с датчиков должны быть переданы для дальнейшей обработки и анализа. На выбор формата передаваемых и, впоследствии, хранимых данных влияют следующие факторы:

- количество датчиков;
- частота проводимых измерений;
- интерфейс первичных преобразователей;
- дополнительные метаданные, связанные с наличием меток времени, идентификаторов пакетов и принадлежности датчика к измерительному каналу и т.п.

В качестве наиболее предпочтительных выделены следующие форматы данных [5]:

- формат JSON (JavaScript Object Notation);
- бинарный формат.

JSON – это текстовый формат, доступный для просмотра в любом текстовом редакторе, что упрощает отладку и анализ данных, при этом формат является структурированным, он совместим с языками программирования, что делает его универсальным для передачи данных. Информация, представленная в бинарном формате, требует меньшего места для хранения и позволяет снизить время на передачу данных.

Исходные сведения и результаты работы ИИС должны быть помещены в базу данных. В связи с чем выделены ключевые критерии, которые следует учитывать при проектировании системы хранения данных:

- объём и структура данных определяет выбор типа базы данных (реляционной или NoSQL);
- требования резервного копирования данных, в том числе заданный уровень автоматизации и применение внешних носителей таких как облачные хранилища;
- требования обеспечения безопасности данных, включая контроль доступа и защиту от несанкционированного доступа;
- необходимо наличия интерфейсов API при интеграции и доступа к данным из других систем.

В ходе работы предлагается вариант реализации модели базы данных MySQL (рисунок 2).

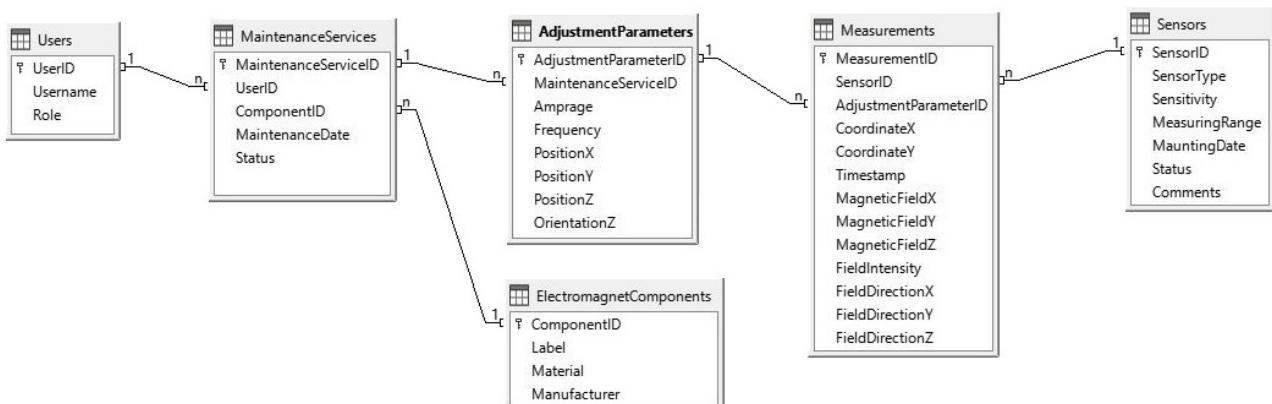


Рис. 2. Вариант модели реляционной базы данных MySQL

Предполагается, что измерения магнитного поля могут быть выполнены датчиками различного типа. Сведения о датчиках содержит таблица Sensors. Результаты измерения будут сохранены в таблице Measurements. Характер, используемых управляющих сигналов для индукторов-электромагнитов, определяется параметрами таблицы AdjustmentParameters. Таблица MaintenanceServices – содержит сведения о примененных методиках и измерительных схемах.

Предполагается, что представленный вариант модели базы данных позволит структурированно хранить информацию, которая в дальнейшем будет использоваться для сборки и наладки МТА. При этом допустим подход реализации базы данных в виде веб-сервера, с организацией доступа через HTTP-запросы (рисунок 3).

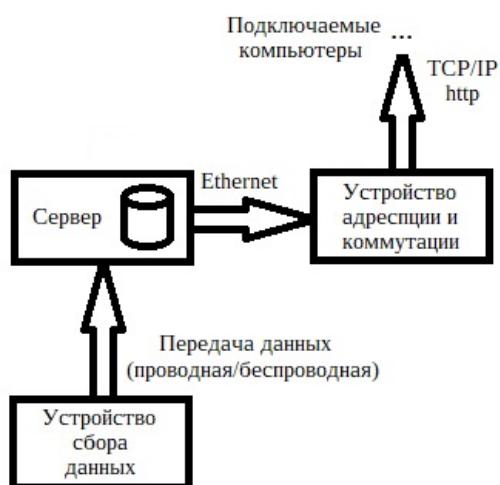


Рис. 3. Вариант подключения компьютеров к базе единого веб-сервера

Таким образом, рассмотрен подход и выделены основные аспекты проектирования и разработки ИИС для контроля параметров компонентов МТА. Особенностями системы являются наличие в работе ИИС этапа коррекции значений параметров за счет введение коэффициентов для управляющих сигналов, контроль магнитного поля в опорных точках, построение реляционной базы данных, применение которой предполагает учёт и идентификацию компонентов МТА не только на этапе сборки, но и в процессе дальнейшего технического обслуживания.

### Библиографический список

1. Саморукова О.Д., Крошилин А.В., Крошилина С.В., Жулева С.Ю. Задачи разработки систем медицинского назначения при выборе схемы медикаментозного лечения // Вестник РГРТУ, № 88, 2024. – С. 106-114.
2. Сотников А.А. Теоретические принципы и методика моделирования сигналов информационно-управляющих систем // Вестник РГРТУ, № 90, 2024. – С. 121-132.
3. A Survey of JSON-compatible Binary Serialization Specifications / Juan Cruz Viotti\*Department of Computer ScienceUniversity of OxfordOxford - January 2022.
4. Абрамов А.М. Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП // Вестник РГРТУ, № 90, 2024. – С. 133-143.
5. A Survey of Sensor Placement Strategies for Environmental Monitoring / 42nd South Eastern Symposium on System TheoryUniversity of Texas at TylerTyler, TX, USA, March 7-9, 2010.
6. Silberschatz A., Korth H.F., Sudarshan S. : Database System Concepts, 7th edition / Концепции Систем баз данных, 7-е издание — 2019 г.

УДК 621.3.087.92; ГРНТИ 90.27.34

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЦП ПО СТАНДАРТУ IEEE 1241

**А.М. Абрамов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, abramov.a.job@yandex.ru*

**Аннотация.** Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) относятся к классу наиболее распространенных компонентов измерительной техники, а их поверка является хорошо известной и сложной проблемой. Для определения статических характеристик АЦП по стандарту IEEE 1241 требуется высокоточный источник сигнала для формирования треугольного или синусоидального испытательного сигнала, а для определения динамических характеристик АЦП, как правило, необходим источник однотонального синусоидального сигнала, с отношением сигнал/шум и коэффициентом гармонических искажений в 10 раз лучше, чем у испытываемого АЦП.

**Ключевые слова:** АЦП, статические характеристики, динамические характеристики, ошибка квантования, быстрое преобразование Фурье, спектральное разложение.

## DETERMINATION OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ADC BASED ON THE IEEE 1241 STANDARD

**A.M. Abramov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, abramov.a.job@yandex.ru*

**The summary.** Analog-to-digital converters (ADCs) are among the most common components of measurement technology, and their verification is a well-known and complex problem. To determine the static characteristics of ADCs according to IEEE 1241 standard, a high-precision signal source is required to form a triangular or sinusoidal test signal, while to determine the dynamic characteristics of ADCs, as a rule, a single-tone sinusoidal signal source is required, with signal-to-noise ratio and harmonic distortion coefficient 10 times better than the tested ADC.

### **Введение**

Поскольку большое количество современных средств измерений имеют в своем составе АЦП, то на этапе преобразования аналоговой величины в последовательность цифровых отсчетов всегда возникает ряд погрешностей. Среди них выделяют статическую, динамическую, датирования отсчетов и другие. Все погрешности безусловно оцениваются производителями интегральных АЦП, но проблема состоит в том, что на сегодняшний день в России применяется большое разнообразие устройств АЦП, изготовленных в основном за рубежом, в разных странах и компаниях, и реализующих различные методы преобразования. Производители используют свои методики и нормы при определении метрологических характеристик АЦП, которые необходимо привести в соответствие с отечественными нормами для внесения приборов в реестр СИ РФ и дальнейшего их использования. Поэтому актуальной задачей является анализ зарубежного стандарта, определяющего методики и нормы для тестирования метрологических характеристик АЦП.

### **Анализ стандарта IEEE 1241**

АЦП – устройство, преобразующее непрерывный аналоговый сигнал  $x(t)$  в цифровой дискретный сигнал  $y(t)$ . В идеальном АЦП  $y(t)$  отличается от  $x(t)$  только на ошибку квантования  $\Delta_{\max}$ :

$$\Delta_{\max} = \pm \frac{h_H}{2} = \frac{U_B - U_H}{2(2^K - 2)},$$

где  $h_H$  – номинальный интервал квантования АЦП;

$U_H$  – минимальное напряжение кодового перехода АЦП;

$U_B$  – максимальное напряжение кодового перехода АЦП;

$K$  – разрядность АЦП.

Существующий уровень технологий не позволяет изготавливать идеальные устройства, и в реальном АЦП  $y(t)$  отличается от  $x(t)$  на величину большую, чем на  $\Delta_{\max}$  из-за статических и динамических характеристик АЦП.

К статическим характеристикам АЦП относят дифференциальную (DNL) и интегральную (INL) нелинейность, аддитивную и мультипликативную погрешность. Динамическими характеристиками АЦП являются отношение сигнал/шум (SNR), отношение сигнал/шум и искажения (SINAD), коэффициент гармонических искажений (THD), динамический диапазон свободный от гармоник (SFDR), а также эффективное число разрядов (ENOB).

Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE) разработал и утвердил стандарт для тестирования АЦП [1]. Этот стандарт содержит определения статических и динамических характеристик АЦП, а также описывает методологию тестирования АЦП. Согласно этому стандарту [1] для тестирования АЦП необходим источник сигнала для формирования входного испытательного сигнала с высокой линейностью и низким уровнем шума, и в работах [2-4] приводится описание подобных источников сигнала. Недавно группа авторов разработала новый подход к тестированию статических характеристик АЦП с использованием нелинейных и неточных источников сигнала [5-8].

Наиболее распространенным методом тестирования динамических характеристик АЦП является быстрое преобразование Фурье (БПФ). В качестве источника входного сигнала, как правило, служит генератор однотонального синусоидального сигнала. После спектрального разложения выходного сигнала АЦП методом БПФ (см. рисунок 1) легко определяются динамические характеристики АЦП.

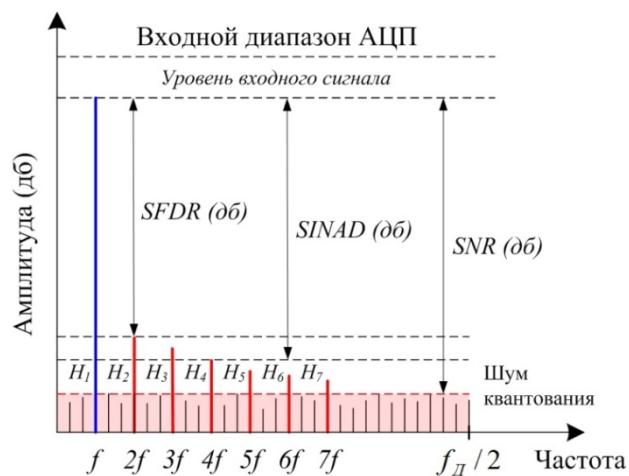


Рис. 1. Спектральное разложение выходного сигнала АЦП

Полученный спектр выходного сигнала АЦП  $y(t)$ , в идеале должно представлять собой одну гармонику  $H_1$  на частоте входного сигнала, но нелинейность самого АЦП приводит к появлению «лишних» гармоник с кратными частотами:  $H_2, H_3, H_4$  и т.д.

Если сравнить уровень кратных гармоник ( $H_2, H_3, H_4$  и т.д.) с уровнем основной гармоники ( $H_1$ ), то получим THD:

$$THD = 20 \lg \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} H_i^2 [RMS]} / U_{\text{сигнала}} [RMS],$$

где  $H_i$  – среднеквадратическое значение амплитуды кратных гармоник;

$U_{\text{сигнала [RMS]}} = (2^K - 2) \times h_H / \sqrt{2}$  – среднеквадратическое значение амплитуды входного гармонического сигнала.

Для учета «лишних» гармоник и шума используется SINAD:

$$\text{SINAD} = 20 \lg \frac{U_{\text{сигнала [RMS]}}}{U_{\text{шума [RMS]}} + \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} H_i^2 [\text{RMS}]}} ,$$

где  $U_{\text{шума [RMS]}} = (h_H / 2) / \sqrt{3}$  – среднеквадратическое значение амплитуды шума АЦП.

Для учета только шума используется SNR:

$$\text{SNR} = 20 \lg \left( \frac{U_{\text{сигнала [RMS]}}}{U_{\text{шума [RMS]}}} \right) \text{дБ.}$$

Для идеального 14 разрядного АПЦ:  $\text{SNR} = 6,02K + 1,76 \text{дБ} = 86,04 \text{дБ}$ .

С SINAD связано эффективное число разрядов (ENOБ):

$$\text{ENOБ} = \frac{\text{SINAD} - 1,76 \text{дБ}}{6,02} .$$

Еще одной важной динамической характеристикой АЦП, учитывающей наибольшую «лишнюю» гармонику является SFDR:

$$\text{SFDR} = 20 \lg \left( \frac{U_{\text{сигнала [RMS]}}}{U_{i_{\max} [\text{RMS}]}} \right) \text{дБ;}$$

где  $U_{i_{\max} [\text{RMS}]}$  – среднеквадратическое значение амплитуды наибольшей кратной гармоники.

Для точного измерения динамических характеристик АЦП по стандарту [1] необходимо, чтобы у источника входного сигнала отношение сигнал/шум и коэффициент гармонических искажений был в 10 раз лучше, чем у испытываемого АЦП.

Чтобы охарактеризовать способность АЦП “работать” со сложными многочастотными сигналами, существует еще одно понятие – интермодуляционные искажения (IMD). Это тоже нелинейные искажения, и их суть, в общем-то, та же самая – появление в выходном сигнале нежелательных частотных составляющих. Только в этом случае они вызваны взаимодействием сигналов с разными частотами. Для оценки IMD, на вход АЦП подают сигнал, который имеет примерно такую форму (см. рисунок 2):



Рис. 2. Входной испытательный сигнал для определения IMD

В спектре такого сигнала присутствуют не одна, а две основных частоты. В этом случае, после спектрального разложения выходного сигнала АЦП, кроме основных двух частот

появляются еще и "лишние" гармоники, вызванные как раз интермодуляционными искажениями.

Коэффициент интермодуляционных искажений показывает, какую часть от основных гармоник составляют "лишние" гармоники.

### **Заключение**

В статье был проанализирован зарубежный стандарт IEEE 1241, посвященный терминологии и методам тестирования АЦП.

### **Библиографический список**

1. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-To-Digital Converters, IEEE Std. 1241-2010.
2. D. Rabijns et al, "Creating spectrally pure signals for ADC testing," Proc. Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 614-618, May 2003.
3. Wen-Ta Lee, Yi-Zhen Liao, Jia-Chang Hsu, Yuh-Shyan Hwang and Jiann-Jong chen, "A high precision ramp generator for low cost ADC test," International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, pp. 2103-2106, Oct 2008.
4. S. Bernard, F. Azais, Y. Bertrand and M. Renovell, "A high accuracy triangle-wave signal generator for on-chip ADC testing," European Test Workshop, pp. 89-94, May 2002.
5. Автоматизация метрологических испытаний цифровых измерительных модулей. Метод скользящих гистограмм / А.М. Абрамов, С.Г. Гуржин, Е.М. Прошин, и др. // М: Издательство «Радиотехника», 2016. – 168с.
6. Абрамов А.М. Учет нелинейной составляющей измерительного сигнала по связанным гистограммам при метрологических испытаниях АЦП // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. С. 95-105.
7. Абрамов А.М. Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-142.
8. Абрамов А.М. Влияние нестационарных эффектов испытательной среды на точность метода связанных гистограмм при метрологическом испытании АЦП // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91.

УДК 621.373.9; ГРНТИ 47.14.17

## **СИНТЕЗ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ**

**С.И. Холопов**

Rязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, holopov.s.i@rsreu.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются технологии синтеза периодических сигналов произвольной формы. Предлагается метод построения синтезатора периодического сигнала произвольной формы, реализованного на совокупности систем фазовой синхронизации. Показано, что форма сигнала может настраиваться непосредственно в процессе его генерации.

**Ключевые слова:** генератор сигнала произвольной формы, синтез сложного сигнала, система ФАПЧ с независимыми регулировками частоты, амплитуды и фазы выходного колебания.

## **SYNTHESIS OF PERIODIC MEASUREMENT SIGNALS ANY SHAPE**

**S.I. Kholopov**

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, holopov.s.i@rsreu.ru

**The summary.** The paper considers technologies for synthesizing periodic signals of arbitrary shape. A method is proposed for constructing a synthesizer of a periodic signal of arbitrary shape, implemented on a set of phase synchronization systems. It is shown that the waveform can be adjusted directly during its generation.

**Keywords:** arbitrary shape signal generator, synthesis of a complex signal, PLL system with independent adjustments of frequency, amplitude and phase of the output oscillation.

При разработке, макетировании, настройке и тестировании различных электронных устройств и систем разработчики часто сталкиваются с тем, что наряду с сигналами стандартной формы, такими как синусоидальные, прямоугольные, импульсные, пилообразные, им приходится применять и сигналы, форма которых отличается от стандартной.

В реальных условиях работы на систему или устройство могут действовать помехи, искажающие форму сигнала. При этом разработчику необходимо знать, как поведет себя исследуемый объект при тех или иных искажениях. Для этого следует либо дополнительно формировать помеху определенного вида и с ее помощью искажать форму полезного сигнала, либо формировать искаженный сигнал специальным генератором, называемым генератором сигнала произвольной формы (ГСПФ). Сигналы произвольной формы применяются при создании, настройке и сопровождении устройств систем радиоэлектроники, телекоммуникаций и радиофизики, в информационно-измерительной технике, медицинских приборах, в научных исследованиях, подготовке специалистов радиоэлектронного профиля.

Существует несколько принципов создания сигналов произвольной формы. Известен метод [1,2], заключающийся в «сшивании» линейно изменяющихся отрезков напряжения различной крутизны нарастания. Недостатком его является то, что создаваемое полезное колебание представляется не гладкой, а ломаной линией.

Ряд генераторов сигналов произвольной формы использует первоначальное дискретное представление формируемого колебания с последующей фильтрацией [3]. Изначально формируемый сигнал задается совокупностью выборок, представленных в виде цифрового кода, записанного в электронное запоминающее устройство. Считываемые кодовые выборки подвергаются цифро-аналоговому преобразованию (ЦАП) с целью получения выходного колебания ступенчатого вида, близкого по форме аналоговому. Для уменьшения шумов квантования, обусловленных ступенчатым изменением сигнала ЦАП, на выходе генератора устанавливается фильтр нижних частот (ФНЧ). Недостатком такого метода формирования является то, что уровень шума, присутствующий в выходном колебании, существенно зависит от разрядности исходного кодового представления сигнала, разрядности ЦАП и согласованности полосы пропускания ФНЧ со спектром формируемого колебания. При произвольной вариации частоты и формы синтезируемого колебания достаточно сложно обеспечить необходимую подстройку параметров ФНЧ так, чтобы его полоса пропускания была согласована со спектром формируемого колебания. Следствием этого является формирование выходного колебания с существенным уровнем дополнительного шума, обусловленного дискретным представлением исходного сигнала.

Рассмотренные методы формирования колебаний произвольной формы требуют предварительной заготовки его исходных составляющих в виде кусочно-линейного или кодового представлений. Когда же форма синтезируемого колебания изначально неизвестна, что часто бывает при решении задач исследовательского типа, использование рассмотренных технологий получения сигнала произвольной формы становится проблематичным.

Известен способ решения задачи синтеза колебаний произвольной формы, базирующийся на их представлении исходя из разложения функции в гармонический ряд Фурье. То есть колебание произвольной формы синтезируется на основе его гармонических составляющих, представляющих собой аналоговые сигналы. В этом случае выходной сигнал, формируемый на основе совокупности аналоговых сигналов, не имеет шумов, свойственных рассмотренным ранее методам.

Данный способ [4] технически воплощается в виде синтезатора сложного сигнала (рисунок 1), состоящего из опорного генератора (ОГ), совокупности  $N$  генераторов-калибраторов с регулировками частоты, амплитуды и фазы (ГКЧАФ), и аналогового сумматора ( $\Sigma$ ). Генераторы-калибраторы реализуются на основе систем фазовой синхронизации (СФС). Формирование выходного колебания  $U_{\text{вых}}$  осуществляется путем установки частоты, амплитуды и фазы колебаний в каждом из генераторов-калибраторов.

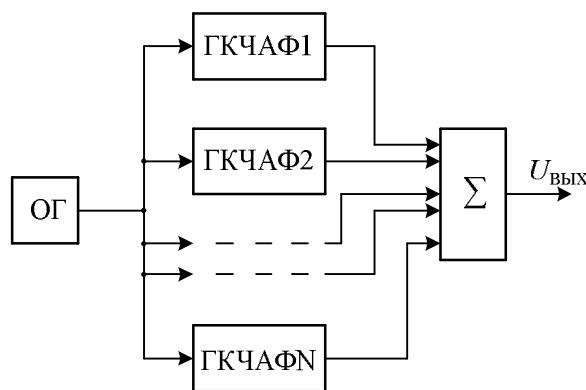


Рис. 1. Структура синтезатора сигнала произвольной формы

В рассматриваемом методе формирования периодического сигнала произвольной формы выполнение настройки параметров ГКЧАФ может быть произведено без предварительного знания конкретного вида выходного колебания. Форму выходного колебания можно настраивать путем изменения параметров каждого ГКЧАФ, наблюдая итоговое колебание с помощью осциллографа. Такой подход значительно упрощает и повышает оперативность создания колебания требуемой формы.

В [4] представлена лишь структурная схема синтезатора сложного сигнала без раскрытия сущности реализации каждого из его блоков. Имеющейся информации не достаточно для того чтобы практически создать указанный синтезатор сложного сигнала. Если реализация генератора опорного колебания и многовходового сумматора напряжений большой сложности не вызывают, то реализация генератора-калибратора с независимыми регулировками частоты, амплитуды и фазы представляет существенную проблему.

Задача генерации гармонического колебания с независимыми регулировками частоты и фазы решается путем использования прямых цифровых синтезаторов (Direct Digital Synthesis, DDS) частоты [5]. В их работе используется принцип, аналогичный рассмотренному в [3]. Основу синтезатора составляет постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), в которое записываются в виде цифрового кода амплитудные значения синусоидального сигнала для различных значений фазы на периоде колебания. Шаг изменения фазы может составлять доли градуса. При последовательном изменении кода адреса ПЗУ на его выход передаются кодовые составляющие, соответствующие последовательному изменению фазы синусоидального сигнала. Данные коды поступают на вход цифро-аналогового преобразователя. В результате на выходе ЦАП формируется гармоническое колебание.

Если из ПЗУчитываются все составляющие синусоидального колебания и разрядность кода выборок мгновенных значений колебания достаточно большая (от 10 до 12 разрядов), на выходе ЦАП формируется колебание, по форме мало отличающееся от аналогового представления соответствующего колебания. Однако в этом случае требуется запоминать в ПЗУ большой объем кодов, последовательный выбор которых не позволяет формировать выходное колебание высокой частоты. Так, если адресная шина ПЗУ составляет 12 разрядов, то при опорной частоте 50 МГц можно будет сформировать выходное гармоническое колебание с частотой не выше  $50000000/2^{12}=50000000/4096 \approx 12207$  Гц. В этом случае из ПЗУ считаются выборки с шагом изменения фазы выходного колебания, равным  $360^\circ/4096 \approx 0,088^\circ$ . При этом форма выходного колебания будет близкой к ее аналоговому представлению.

Для получения частоты в десять раз большей, чем 12.2 кГц, необходимо из ПЗУ считывать не все кодовые выборки подряд, а лишь каждую десятую. В этом случае из ПЗУ считаются выборки с шагом изменения фазы  $0,88^\circ$ . При этом форма колебания на выходе ЦАП будет таковой, что для обеспечения спектральной чистоты формируемого колебания

требуется использовать ФНЧ, устанавливаемый на выходе цифро-аналогового преобразователя.

При формировании гармонических колебаний, когда их частота может настраиваться произвольной, например, используется вариация частоты опорного генератора, будет требоваться соответствующая перестройка ФНЧ, которую для изменяющейся частоты колебания реализовать достаточно сложно.

В [6] рассмотрено устройство регулировки амплитуды и фазы гармонического напряжения, состоящее из двух систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), одна из которых позволяет осуществлять независимую регулировку амплитуды, а другая – фазы колебания. Для осуществления дополнительной регулировки частоты колебания следует на входе данного устройства установить еще одну систему ФАПЧ, с помощью которой можно выполнить синхронизацию («привязку») кратного опорному по частоте выходного колебания и опорного колебания. Таким образом, если рассматривать устройство регулировки амплитуды и фазы с дополнительной системой ФАПЧ в качестве аналога блока ГКЧАФ, то можно отметить, что его реализация достаточно сложна, поскольку основана на трех системах фазовой автоподстройки частоты.

Реализацию блока ГКЧАФ в каждом из  $N$  каналов синтезатора сигнала произвольной формы можно выполнить в виде системы ФАПЧ [7], позволяющей осуществлять независимую регулировку частоты, амплитуды и фазы выходного гармонического колебания. Структура системы ФАПЧ (условно обозначим его номером  $i$ ) представлена на рисунке 2. Она содержит следующие узлы: логический фазовый дискриминатор  $\text{ЛФД}_i$ , формирователь управляющего напряжения  $\text{ФУН}_i$  с нелинейным законом изменения выходного напряжения, астатическое звено, состоящее из интегратора  $\text{И}_i$ , пропорционального звена  $\text{ПЗ}_i$  и сумматора напряжений  $\text{СМ}_i$ , подстраиваемый генератор  $\text{ПГ}_i$  колебаний гармонической формы, усилитель напряжения  $\text{УН}_i$ , компаратор напряжения  $\text{К}_i$  с нулевым порогом сравнения, линия задержки  $\text{ЛЗ}_i$ .

Все системы ФАПЧ генератора сигналов произвольной формы могут иметь одинаковую структуру, поскольку логический фазовый дискриминатор знакового типа [8], используемый в ней, позволяет анализировать знак разности фаз кратных по частоте колебаний. На входы  $\text{ЛФД}_i$  поступают импульсные процессы в форме колебаний с уровнями цифровой логики: на первый (опорный) вход от генератора опорного колебания  $U_{\text{оп}}$ , а на второй – колебания с уровнями цифровой логики  $U_{\text{п}i}$ , полученные из гармонического колебания  $U_{gi}$ , преобразованного компаратором  $\text{К}_i$  к цифровому виду  $U_{\text{pri}}$  и задержанного линией задержки  $\text{ЛЗ}_i$ . Для обеспечения минимальной фазовой ошибки в установленном состоянии и широкой

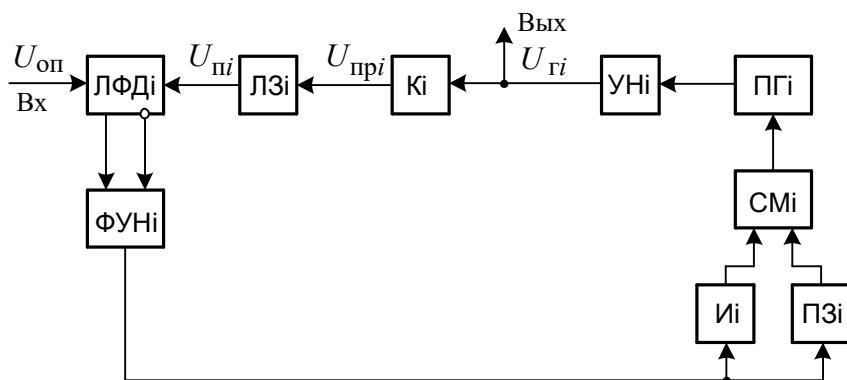


Рис. 2. Структура системы ФАПЧ с независимой регулировкой амплитуды, частоты и фазы

полосы захвата [9] в структуру ФАПЧ введен формирователь нелинейных управляющих напряжений ФУН<sub>i</sub>. Он также обеспечивает преобразование цифрового выходного сигнала ЛФД<sub>i</sub> в аналоговое управляющее напряжение, поступающее на вход подстраиваемого генератора ПГ<sub>i</sub> через пропорционально-интегрирующий фильтр, выполненный в виде интегратора И<sub>i</sub>, пропорционального звена ПЗ<sub>i</sub> и сумматора напряжений СМ<sub>i</sub>.

Центральная частота подстраиваемых генераторов, установленных в каждой из N систем ФАПЧ синтезатора, настраивается на частоту iF<sub>оп</sub>, где i=1, 2, ..., N – номер системы ФАПЧ в структуре генератора сигнала произвольной формы. Причем диапазон перестройки частоты каждой из систем ФАПЧ составляет iF<sub>оп</sub>±F<sub>оп</sub>/2.

Используемый в кольце ФАПЧ фазовый дискриминатор позволяет обеспечивать синхронизацию опорного и подстраиваемого колебаний с фазовой ошибкой Δφ→0 [10]. Таким образом, в режиме синхронизма (установившемся состоянии) опорное и преобразованное к цифровому виду подстраиваемое колебание, а как следствие и выходное колебание без учета задержек в компараторе и линии задержки, имеют одинаковые фазы. Изменяя параметры линии задержки можно задать сдвиг по фазе Δφ<sub>i</sub>=2πiF<sub>оп</sub>τ<sub>i</sub> в i-том кольце ФАПЧ, где τ<sub>i</sub> – параметр задержки цифрового колебания линией задержки, определяющий фазовое соотношение опорного и формируемого колебаний. Причем изменение фазы выходного колебания происходит без изменения его формы.

Так как выходное напряжение, прежде чем оно поступил на фазовый дискриминатор, преобразуется компаратором с нулевым уровнем сравнения в цифровой эквивалент, величина амплитуды выходного напряжения может иметь любое значение, отличное от нулевого. Это не сказывается на режиме работы системы ФАПЧ. Поэтому с помощью усилителя напряжения УН<sub>i</sub> можно независимо регулировать уровень гармонического напряжения в каждой из систем ФАПЧ.

Изложенное показывает, что в каждом из каналов (системах ФАПЧ) синтезатора можно независимо устанавливать произвольные значения фазы, амплитуды выходного колебания и кратности частоты выходного колебания относительно опорной частоты.

Выходное колебание U<sub>вых</sub> генератора сигналов произвольной формы представляется выражением

$$U_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^N U_{ri} = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi i F_{\text{оп}} t + \varphi_i),$$

где U<sub>ri</sub> – напряжение i-той гармонической составляющей;

A<sub>i</sub> – амплитуда i-той гармонической составляющей выходного колебания;

t – время;

φ<sub>i</sub>=2πiτ<sub>i</sub>/T<sub>оп</sub> – фаза i-той гармонической составляющей;

τ<sub>i</sub> – задержка линией задержки колебания i-той гармонической составляющей;

T<sub>оп</sub>=1/F<sub>оп</sub> – период опорного колебания.

В качестве примера синтеза сигнала произвольной формы рассмотрим его реализацию на основе трех гармонических составляющих с частотами F<sub>оп</sub>, 2F<sub>оп</sub>, 3F<sub>оп</sub> с произвольными значениями амплитуд и фаз.

Формула, определяющая связь выходного напряжения U<sub>вых</sub>=U<sub>r</sub> с напряжениями гармоник U<sub>r1</sub>, U<sub>r2</sub>, U<sub>r3</sub>, на основе которых реализуется его синтез, следующая:

$$U_r = U_{r1} + U_{r2} + U_{r3} = A_1 \sin(2\pi F_{\text{оп}} t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi 2F_{\text{оп}} t + \varphi_2) + A_3 \sin(2\pi 3F_{\text{оп}} t + \varphi_3).$$

Механизм получения выходного колебания U<sub>r</sub> генератора при амплитудах A<sub>1</sub>=0.5, A<sub>2</sub>=0.8, A<sub>3</sub>=0.7, частотах F<sub>оп</sub>=1000, 2F<sub>оп</sub>=2000, 3F<sub>оп</sub>=3000 и фазах φ<sub>1</sub>=π/6, φ<sub>2</sub>=-2π/3, φ<sub>3</sub>=2π/3 составляющих его гармонических колебаний показан на рисунке 3.

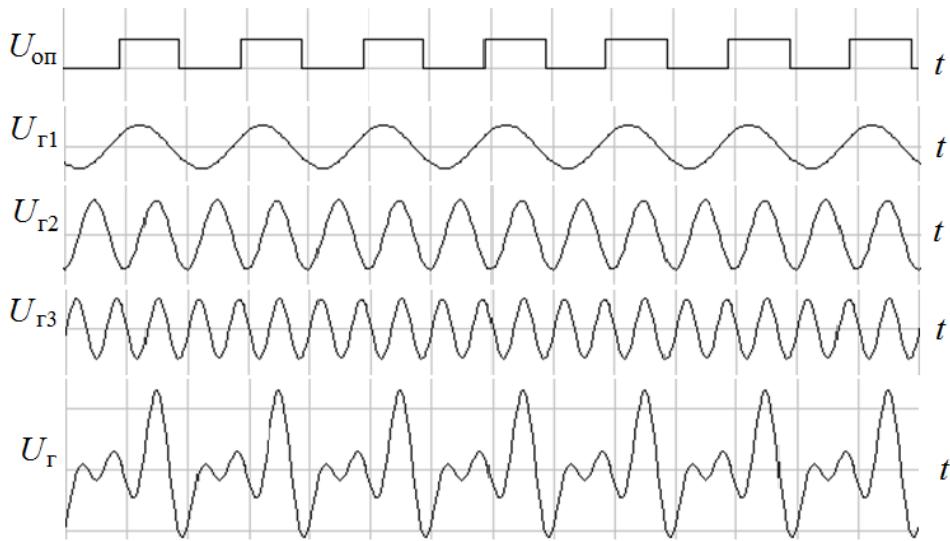


Рис. 3. Иллюстрация процесса формирования сигнала произвольной формы на основе трех гармонических составляющих с заданными частотными, амплитудными и фазовыми параметрами

Рассмотренный механизм синтеза сигналов произвольной формы защищен патентом [11]. В нем изменение формы выходного колебания можно осуществлять непосредственно в процессе формирования колебания, то есть в режиме реального времени.

Сигналы произвольной формы, синтез которых описан в статье, могут найти применение при решении задач измерения параметров полупроводниковых приборов и встраиваемых систем, настройки и сопровождения промышленного оборудования, эксплуатации медицинских электронных устройств, отладки и испытания устройств технических лабораторий, проведения научных исследований.

### Библиографический список

1. А.с. СССР № 2019908 МПК H03K 4/00. Генератор сигналов сложной формы. / Кирюхин К.Н., Фроленков М.А. Заявлено 25.04.1991 (№ 4931515/21); опубл. 15.09.1994.
2. Пат. РФ № 99120936 МПК H03K 4/02. Способ формирования сигнала сложной формы. / Капля Э.И. Заявлено 04.10.1999 (№ 99120936/99); опубл. 10.09.2001.
3. Дедюхин А.А. Прецизионные генераторы сигналов сложной формы А-КИП ГСС-93/1 и ГСС-93/2.// Компоненты и технологии. 2004. № 3. – С. 204-206.
4. Жилин Н.С. Принципы фазовой синхронизации в измерительной технике. – Томск: Радио и связь, 1989. – 384 с.
5. Ридико Л. DDS: Прямой синтез частоты // Компоненты и технологии. 2001. № 8. – С. 50-56.
6. А.с. СССР № 1019361 МКИ G01R 25/04. Устройство для регулировки амплитуды и фазы переменного напряжения в компенсационных измерителях напряжения / Жилин Н.С. Заявлено 16.05.1978 (№ 2618527/18-25); опубл. 23.05.1983. Бюл. № 19.
7. Пат. РФ № 2689432 МПК H03L 7/00. Функциональный преобразователь с регулировкой амплитуды и фазы выходного колебания / Холопов С.И. Заявлено 07.05.2018 (№ 2018116919); опубл. 28.05.2019.
8. Холопов С.И. Математическая модель когерентного умножителя частоты // Вестник РГРТА. – Рязань, 1998. Вып.4. – С. 26-29.
9. Холопов С.И. Расширение полосы захвата релейной астатической системы фазовой синхронизации // Вестник РГРТУ. – Рязань, 2013. № 3 (выпуск 45). – С. 49-53.
10. Холопов С.И. Исследование способа увеличения полосы захвата релейной системы фазовой синхронизации // Вестник РГРТУ. – Рязань, 2016. № 3 (выпуск 57). – С. 9-14.
11. Пат. РФ № 2808222 МПК H03K 3/64, H03L 7/087. Генератор сигналов произвольной формы / Холопов С.И. Заявлено 10.03.202-23 (№ 2023105714); опубл. 28.11.2023. Бюл. № 34.

УДК 615.847.8; ГРНТИ 76.13.25

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПОГРЕШНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОМПЛЕКСНОЙ ХРОНОМАГНИТОТЕРАПИИ

С.Г. Гуржин, А.В. Шуляков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, gurzhin@mail.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены особенности применения и методика метрологических исследований и определения погрешностей оптических датчиков, которые используются в диагностических каналах регистрации физиологических процессов для оперативной оценки функционального состояния пациента во время сеанса магнитотерапии.

**Ключевые слова:** комплексная хрономагнитотерапия, оптические датчики, регистрация физиологических процессов, сердцебиение, дыхание, давление, сатурация, погрешности преобразования, виртуальные средства.

## FEATURES OF APPLICATION AND ERRORS OF OPTICAL SENSORS USED IN COMPLEX CHRONOMAGNETOTHERAPY

S.G. Gurzhin, A.V. Shuljakov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, gurzhin@mail.ru*

**Annotation.** The article examines the features of application and methods of metrological studies and determination of errors of optical sensors, which are used in diagnostic channels for recording physiological processes for prompt assessment of the functional state of the patient during a magnetic therapy session.

**Keywords:** complex chronomagnetotherapy, optical sensors, registration of physiological processes, heartbeat, respiration, pressure, saturation, conversion errors, virtual means.

В работе [1] предложена структура лечебно-диагностического комплекса хрономагнитотерапии общего воздействия, оснащенного **контуром биотехнической обратной связи** (БТОС) **реального времени**, позволяющего в течение сеанса магнитотерапии автоматически, оперативно и объективно оценивать текущее функциональное состояние пациента посредством одновременной регистрации четырех физиологических процессов сердцебиения, сатурации, артериального давления и дыхания (рис. 1).

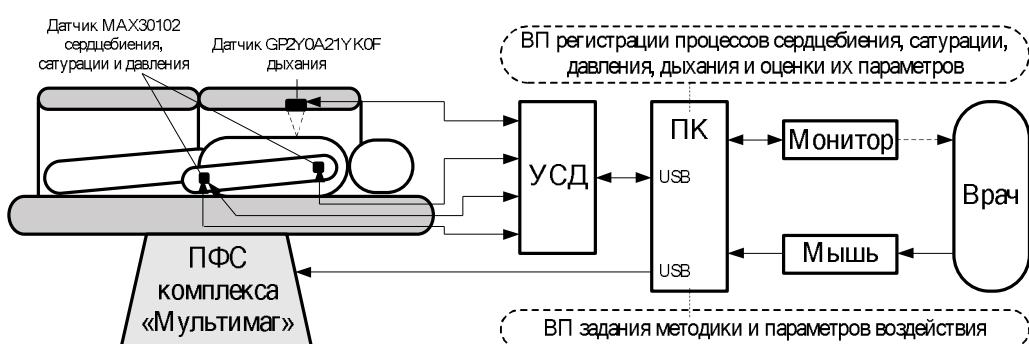


Рис. 1. Лечебно-диагностический комплекс магнитотерапии «Мультимаг» и размещение оптических датчиков

В контур БТОС входят, прежде всего, средства формирования и генерации лечебного магнитного воздействия в виде полеформирующей системы (ПФС) комплекса «Мультимаг», персональный компьютер (ПК), виртуальные приборы (ВП) задания методики и параметров воздействия, монитор, мышь и врач. Ответные реакции организма пациента на заданное магнитное воздействие регистрируются с помощью оптических датчиков контактного и бесконтактного типов, устройства сбора данных (УСД) и ВП регистрации четырех физиологических процессов, которые замыкают контур БТОС.

В качестве УСД предлагается использовать микропроцессорный модуль ESP32-DevKitC компании Espressif Systems [2], который имеет широкий функционал, высокие технические характеристики, небольшие размеры и может быть легко встроен в ПФС комплекса «Мультимаг» (рис. 2,в).

На основании проведенных авторами экспериментальных исследований серийно выпускаемых датчиков физических величин, пригодных для регистрации и мониторинга жизненно важных показателей человека в условиях действия лечебных электромагнитных полей (ЭМП), сделан выбор в пользу оптических датчиков двух типов (рис. 2, а и б).

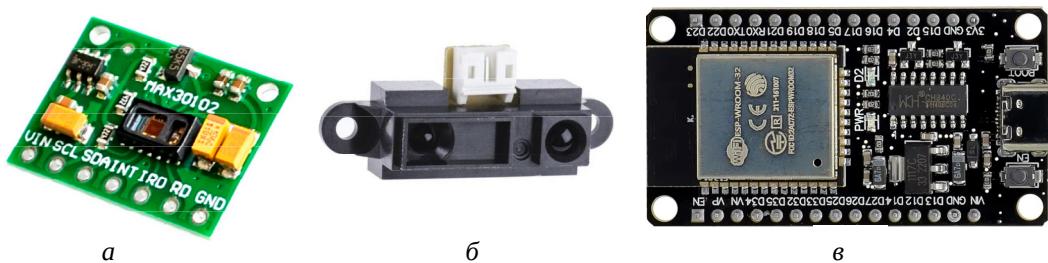


Рис. 2. Датчик сердцебиения, сатурации и давления MAX30102 (а);  
датчик дыхания GP2Y0A21YK0F (б); устройство сбора данных (в),

Совокупность достоинств контактного датчика пульсоксиметрии MAX30102 и определило его обоснованный выбор, а именно:

- высокий показатель отношения сигнал/шум при действии ЭМП и других факторов;
- высокая точность и быстродействие преобразования сигналов (сигма-дельта АЦП разрядностью 18 бит и частотой дискретизации 10,24 МГц);
- небольшие размеры 15,5×19,5×2,5 мм;
- сверхнизкое энергопотребление (<1 мВт);
- программируемая скорость вывода данных с АЦП 50-3200 выборок/с;
- устойчивость к вибрациям, двигательным артефактам, внешним засветкам и изменениям температуры при измерениях;
- напряжение питания 2,3-5,5 В;
- рабочая температура -40-85 °C;
- стандартный интерфейс передачи данных I2C.

Датчик MAX30102 представляет собой фактически высокочувствительную полнофункциональную измерительную систему [3], принцип работы которой основан на фото приёме и анализе отраженного от тканей тела пациента излучения от двух встроенных свето-диодов красного 660 нм и инфракрасного 940 нм диапазона длин волн. Оптимально подобранные длины волн излучателей позволяют с высокой точностью регистрировать процессы насыщения крови кислородом и кровенаполнения сосудов пациента.

Особенность применения датчика MAX30102 в комплексе магнитотерапии «Мультимаг» заключается в том, что с помощью пары датчиков удается регистрировать одновременно три физиологических процесса сердцебиение, сатурацию и артериальное давление. Оба датчика крепятся к левой руке пациента один на запястье, а другой в области плечевой кости и направлены они оптической системой к телу (рис. 1).

В данном случае погрешность преобразования контролируемых параметров пациента будет в основном зависеть от правильности позиционирования датчика относительно кровеносных сосудов и надежности его крепления на выбранном участке тела. Уменьшение влияния названных факторов на погрешность преобразования датчика можно достичь путем проведения предварительных измерений параметров с помощью разработанных методик и про-

грамм ВП в среде LabVIEW перед сеансом магнитотерапии [4-6]. Данные ВП позволяют оперативно, визуально и количественно оценить интенсивность регистрируемых сигналов и помех в местах установки датчиков, и по максимуму отношения сигнал/помеха определить наилучшее положение датчика.

Бесконтактный оптический датчик компании Sharp GP2Y0A21YK0F [7] предлагается использовать для регистрации процесса дыхания пациента [8]. Он является позиционно-чувствительным датчиком (ПЧД) расстояния с излучателем – светодиодом (СД) и приемником – фотодетектором (ФД) инфракрасного диапазона, работающим по методу триангуляции (рис. 3, а). Поскольку габаритные размеры датчика небольшие  $13 \times 13,5 \times 29,5$  мм он легко устанавливается в нависающем сегменте ПФС напротив грудной клетки пациента (рис. 1).

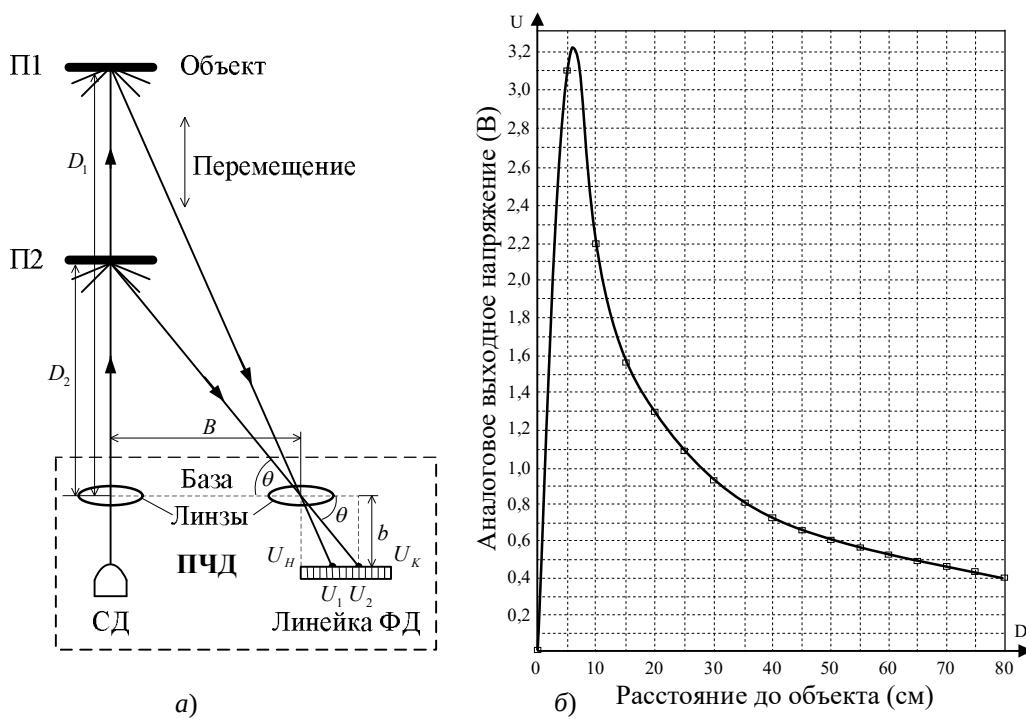


Рис. 3. Принцип работы оптического ПЧД (а) и его функция преобразования (б)

Сфокусированный линзой луч со СД длиной волны  $850 \pm 70$  нм излучается в сторону объекта, отражается от его поверхности и воспринимается ФД в виде фоточувствительной линейки (ФЧЛ) [9].

Местоположение светового пятна на ФЧЛ соответствует ее электрическому сопротивлению, которое преобразуется в аналоговое напряжение  $U$ , пропорциональное расстоянию до объекта (рис. 3, б). Функция преобразования ПЧД определяется из соотношений подобия прямоугольных треугольников, образуемых лучами (рис. 3, а):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{D}{B} = \frac{b}{U} \text{ или } U = \frac{b}{\operatorname{tg} \theta} = \frac{bB}{D} = \frac{K}{D},$$

где  $\theta$  – угол между отраженным от объекта лучом и линией, соединяющей линзы ПЧД;

$D$  – расстояние от линзы излучателя до объекта;

$B$  – база ПЧД (расстояние между линзами);

$b$  – расстояние от линзы приемника до ФЧЛ;

$U$  – выходное электрическое напряжение ПЧД;

$K$  – коэффициент, зависящий от размеров  $B$  и  $b$ .

Особенность применения датчика GP2Y0A21YK0F в комплексе магнитотерапии «Мультимаг» заключается в том, что его местоположение зафиксировано в нависающем сег-

менте ПФС, а расстояние между датчиком и пациентом регулируется с помощью подъемника ложемента в небольших пределах 5-15 см.

Важным преимуществом оптического датчика GP2Y0A21YK0F по сравнению с ультразвуковым датчиком HC-SR04, который на сегодняшний день используется в комплексе «Мультимаг», является положенный в его основу работы **триангуляционный** метод измерения расстояния. Метод практически исключает эффект интерференции излучения, нечувствителен к разным отражающим свойствам поверхности объекта, его цвету и форме.

К преимуществам следует также отнести в два раза больший эффективный угол обзора оптического датчика, равный 30 градусам.

Благодаря инфракрасному излучению с модулированной частотой в сторону объекта, удается практически полностью отстроиться от внешних световых помех, т.е. свести погрешность от действия основного влияющего фактора к нулю.

Учитывая отмеченные преимущества оптического датчика (ОД) и ограниченный рабочий диапазон измерения расстояния от датчика до грудной клетки пациента, приблизительно равный 8-25 см, возникла необходимость произвести оценку действительной погрешности датчика GP2Y0A21YK0F в реальных условиях.

Для этого предложена методика метрологических исследований и разработаны аппаратно-программные средства [10], реализующие стандартные методы поверки, рекомендованные для динамических измерений [11], с использованием образцовой меры линейного перемещения и испытательного сигнала в виде закона перемещения (рис. 4).

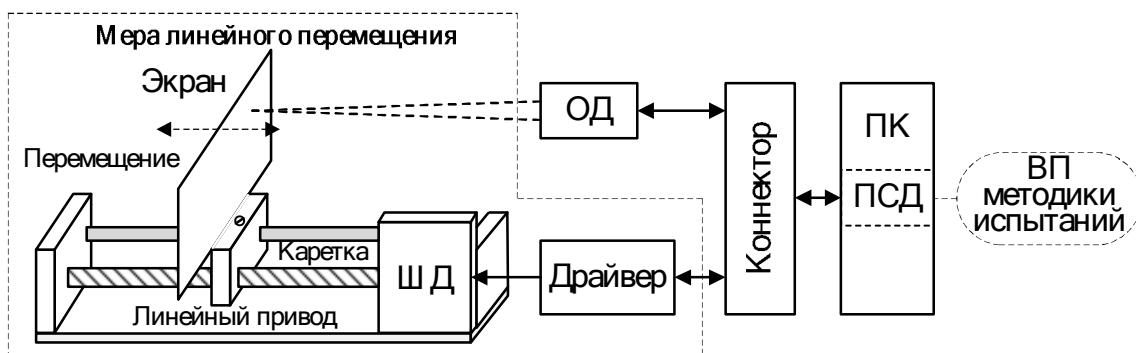


Рис. 4. Структура системы метрологических исследований оптического датчика GP2Y0A21YK0F

Мера линейного перемещения состоит из шагового двигателя (ШД) – SPS-15RF-172FH, драйвера ШД – DRV8825, линейного привода с кареткой и отражающего экрана. Управление мерой и ОД производится с помощью программы ВП методики испытаний, установленной на ПК, через плату сбора данных (ПСД) компании National Instruments – NI PCIe-6321 и внешний соединитель – коннектор NI BNC-2120.

Программа ВП методики испытаний [10], алгоритм которой изображен на рисунке 5, позволяет пользователю:

- задавать закон (сигнал) перемещения отражающего экрана, расположенного ортогонально оптической оси датчика, в виде синусоидальной и треугольной форм и его информативные параметры – амплитуду, период и скорость перемещения;
- регистрировать сигнал перемещения, отраженный от экрана;
- отображать на мониторе ПК образцовый заданный сигнал перемещения и зарегистрированный сигнал датчиком;
- автоматически производить многократные измерения перемещений экрана, их обработку, нормирование сигналов, оценку погрешности измерений и визуализацию результатов на мониторе ПК.

В одном из ряда проведенных экспериментов был выбран синусоидальный закон перемещения экрана с амплитудой  $\pm 10$  мм относительно условного нулевого положения. На периоде заданного сигнала перемещения реализовывалось 1000 положений экрана, с паузой

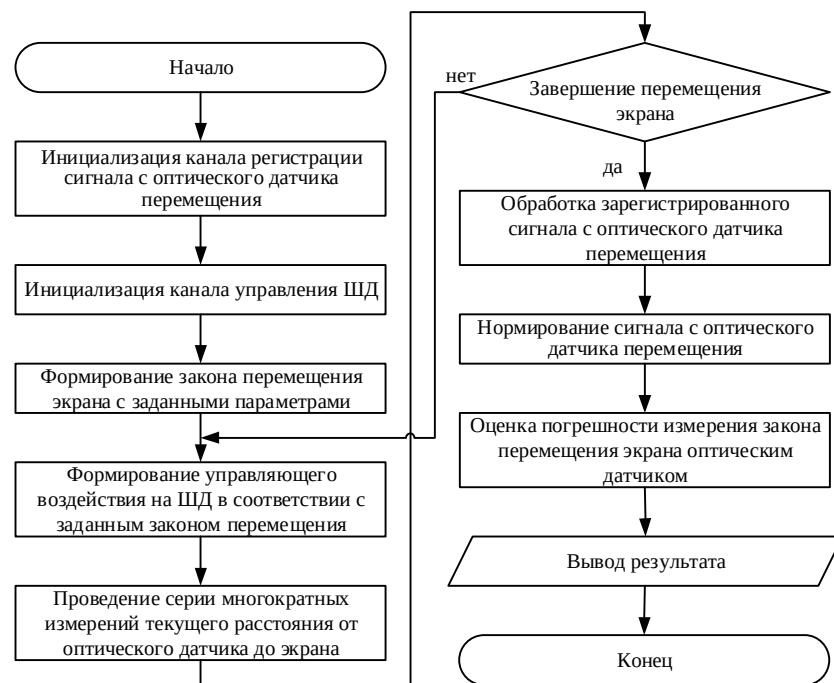


Рис. 5. Алгоритм программы метрологических исследований и оценки погрешности  
ОД расстояния GP2Y0A21YK0F

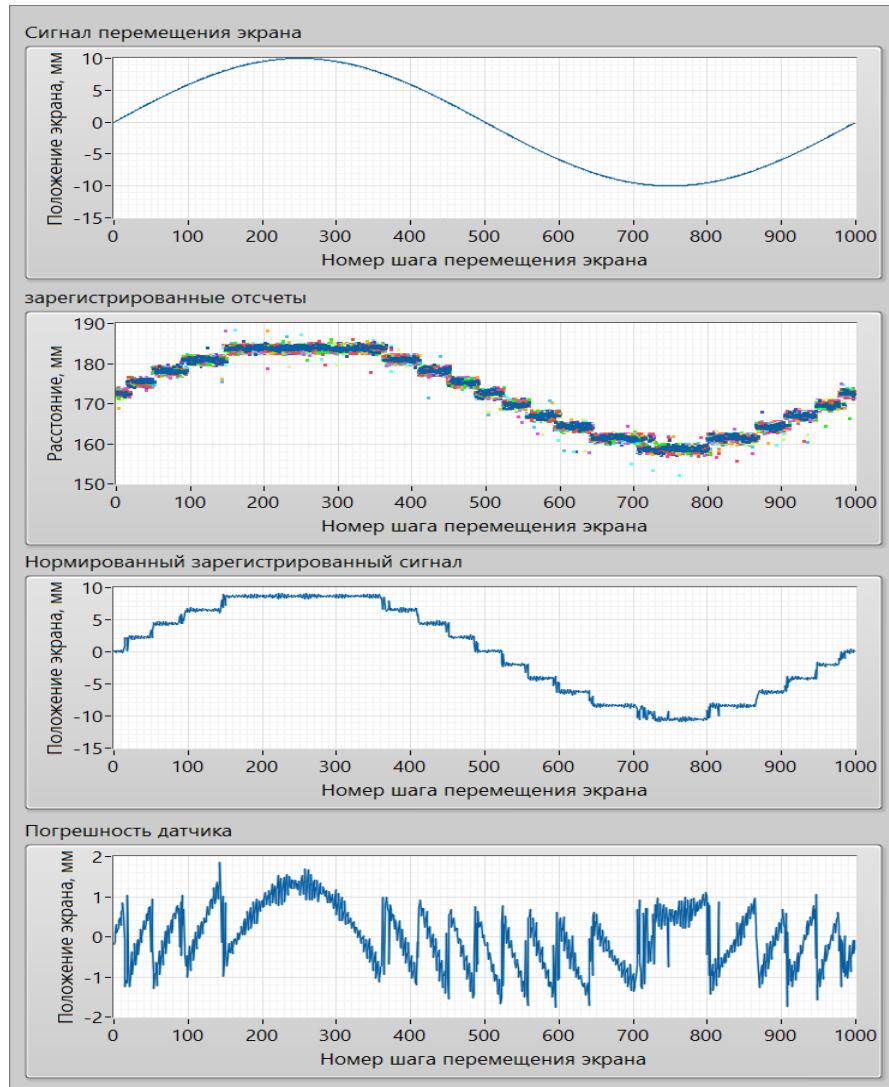


Рис. 6. Интерфейсы передних панелей программы ВП методики испытаний ОД расстояния GP2Y0A21YK0F

Обработка зарегистрированного сигнала перемещения экрана заключается в усреднении результатов многократных измерений расстояния ОД для каждого положения экрана, исключении неинформативной постоянной составляющей сигнала и приведении диапазона зарегистрированного сигнала к диапазону образцового сигнала, т.е. нормировании (рис. 7).

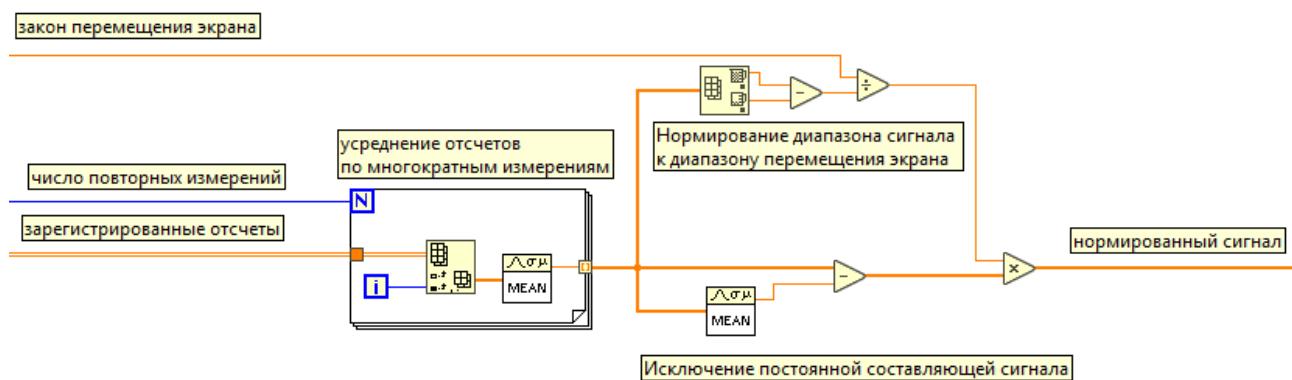


Рис. 7. Блок-диаграмма программы ВП обработки и нормирования зарегистрированного сигнала перемещения экрана ОД

Абсолютная погрешность измерения расстояния ОД определялась как разность исходного сигнала закона перемещения экрана и нормированного сигнала

$$\Delta_i = l_{зади} - l_{изм},$$

где  $i$  – номер шага (положения) экрана при перемещении ( $i = 1, \dots, 1000$ );

$l_{зади}$  – заданная законом перемещения координата положения экрана на  $i$ -м шаге;

$l_{изм}$  – измеренное ОД нормированное значение координаты положения экрана на  $i$ -м шаге.

Для полученных значений погрешности измерения расстояния по шагам определялась оценка среднеквадратического отклонения (СКО)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2},$$

где  $n$  – количество шагов (положений) экрана  $n = 1000$ ;

$\bar{\Delta}_i$  – среднее значение абсолютной погрешности измерения  $\bar{\Delta}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$ .

При указанных параметрах эксперимента расчетное значение СКО погрешности составило 0,74 мм, что является очень хорошим показателем.

Таким образом, предложен и разработан способ организации и реализации БТОС для лечебно-диагностического комплекса магнитотерапии «Мультимаг» на основе применения двух стандартных типов ОД и оригинальных программных средств. Рассмотренные ОД позволяют с высокой точностью и помехоустойчивостью регистрировать, анализировать и измерять параметры четырех физиологических процессов пациента сердцебиение, сатурацию, артериальное давление и дыхание оперативно и в реальном масштабе времени, что существенно повышает эффективность магнитотерапии.

### Библиографический список

- Гуржин С.Г., Шуляков А.В. Лечебно-диагностический комплекс хрономагнитотерапии // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2021: сб. тр. XXXIV Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2021. С. 36-39.
- Стукало С. Компания Espressif. Обзор продукции // Беспроводные технологии, №4. 2018. С. 8-13.
- Чистяков В. Пульсоксиметрия от Maxim: новый датчик MAX30102 / Новости электроники, № 7. 2016. С. 36-39.
- Свид. 2020612719 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для непрерывной регистрации пульсовой волны и автоматического измерения значимых параметров пациента во время сеанса магнитотерапии / С.Г. Гуржин, А.В. Шуляков, М.Б. Каплан; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». Опубл. 28.02.2020, Бюл. № 3. – 1 с.
- Свид. 2020612686 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для непрерывного автоматического измерения и регистрации степени насыщения кислородом крови пациента во время сеанса магнитотерапии / С.Г. Гуржин, А.В. Шуляков, М.Б. Каплан; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». Опубл. 28.02.2020, Бюл. № 3. – 1 с.
- Свид. 2020612685 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для непрерывной регистрации артериального давления пациента и автоматического измерения значимых параметров во время сеанса магнитотерапии / С.Г. Гуржин, А.В. Шуляков, М.Б. Каплан; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». Опубл. 28.02.2020, Бюл. № 3. – 1 с.
- Техническая спецификация на датчик измерения расстояния GP2Y0A21YK0F [Электронный ресурс]. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1657845.pdf> – 9 с.
- Свид. 2023665496 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для непрерывной регистрации процесса дыхания пациента, оперативного измерения информативных параметров и оценивания различных диагностических показателей во время сеанса магнитотерапии / С.Г. Гуржин, А.В. Шуляков; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». Опубл. 17.07.2023, Бюл. № 7. – 1 с.

9. Топильский В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи: учебное пособие. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 496 с.
10. Свид. 2021617649 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа метрологических исследований оптического датчика перемещения и оценки погрешности его преобразования / С.Г. Гуржин, А.В. Шуляков, В.Л. Нгуен; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». Опубл. 18.05.2021, Бюл. № 5. – 1 с.
11. Грановский В.А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984 – 224 с.

УДК 681.88; ГРНТИ 47.55.31

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОНИТОРИНГ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Т.Д. Абдиматова

АО «Академия гражданской авиации» Ахметова 44, 050039,  
г. Алматы, Республика Казахстан, t.abdimatova@agakaz.kz

**Аннотация.** В статье представлен обзор по поиску областей применения ультразвукового мониторинга. Области применения были разделены на два больших класса, такие как биологические и техногенные процессы. Ультразвуковой мониторинг разделяется на активный и пассивный методы проведения измерений. Для обзора выбраны пассивные методы измерения, где источниками сигналов являются сами процессы. Ультразвуковой мониторинг требует наличие высокочастотного измерителя для возможности обработки процессов больших частот. В статье представлен разработанный измеритель звуковых и ультразвуковых сигналов с АЦП с частотой дискретизации 500 кГц.

**Ключевые слова:** ультразвук, мониторинг, колебания, микрофон, частота.

## ULTRASONIC MONITORING OF BIOLOGICAL AND MAN-MADE PROCESSES

T.D. Abdimatova

JSC "Academy of Civil Aviation" Akhmetov 44, 050039,  
Almaty, Republic of Kazakhstan, t.abdimatova@agakaz.kz

**Abstract.** The article presents an overview of the search for ultrasound monitoring applications. The fields of application were divided into two large classes, such as biological and man-made processes. Ultrasonic monitoring is divided into active and passive measurement methods. Passive measurement methods, where the signal sources are the processes themselves, are selected for the review. Ultrasonic monitoring requires a high-frequency receiver, able to measure high-frequency processes. The article presents a developed sound and ultrasonic signal receiver with an ADC with a sampling frequency of 500 kHz.

**Keywords:** ultrasound, monitoring, vibrations, microphone, frequency.

### Введение

Множество процессов, как природного, так и техногенного происхождения, служат источниками звуковых колебаний. К естественным процессам можно отнести такие явления, как ветер, дождь, гром, а также звуки, издаваемые животными. Техногенные источники звука включают в себя шумы, возникающие в процессе работы механизмов, таких как транспорт, строительная техника, работа промышленных машин и оборудования. Эти звуковые колебания могут оказывать значительное влияние на окружающую среду и здоровье человека, вызывая как положительные, так и отрицательные эффекты.

Понятие «ультразвук» приобрело в настоящее время более широкий смысл, чем просто обозначение высокочастотной части спектра акустических волн. С ним связаны целые области современной физики, промышленной технологии, информационной и измерительной техники, медицины и биологии.

Широкое распространение ультразвуковых методов обусловлено появлением новых надёжных средств излучения и приёма акустических волн, с одной стороны, обеспечивших возможность существенного повышения излучаемой ультразвуковой мощности и увеличения чувствительности при приёме слабых сигналов, а с другой - позволивших продвинуть верхнюю границу диапазона излучаемых и принимаемых волн в область гиперзвуковых частот.

Характерной особенностью современного состояния физики и техники ультразвука является чрезвычайное многообразие его применений, охватывающих частотный диапазон от слышимого звука до предельно достижимых высоких частот и область мощностей от долей милливатта до десятков киловатт [1].

Ультразвук – разновидность звуковых колебаний, но он не слышен человеку, хотя многие животные используют его для коммуникаций и ориентирования. Например, летучие мыши и дельфины развили сложные гидроакустические системы, которые позволяют им обнаруживать и локализовать добычу в условиях, когда зрение неэффективно. Уши насекомых обычно используют барабанные перепонки для обнаружения звука, а чувствительность к ультразвуку развилась, по крайней мере, у шести отрядов насекомых. Некоторые мотыльки улетают от ультразвука низкой амплитуды, потому что низкие амплитуды могут означать, что летучая мышь находится далеко, и мотылек может успеть улететь. Однако, услышав ультразвук высокой интенсивности, тот же мотылек может начать непредсказуемые мощные пикирования в качестве последней отчаянной реакции, чтобы уклониться от летучей мыши, которая, вероятно, находится поблизости. Некоторые виды тигровых молей (Arctiidae) издают ультразвуковые сигналы после того как услышат крики летучих мышей, и они могут сами издавать ультразвуковые сигналы, чтобы помешать обработке эхосигналов летучей мышью [2].

Ультразвуковое исследование в интенсивной терапии изменило парадигму визуализации, позволив врачу получать и интерпретировать изображения, необходимые для принятия клинических решений у постели больного в режиме реального времени. Когда-то считавшееся невозможным, ультразвуковое исследование легких в течение последнего десятилетия стало неотъемлемой частью алгоритмов быстрой оценки острой дыхательной недостаточности [3].

Разработана компьютерная система для контроля качества сварки непосредственно в процессе сварки. Эта система позволила обеспечить высокое качество сварки, если не было обнаружено никаких дефектов, а стоимость сварки была минимизирована. Эта разработка показала, что высокотемпературное поле вокруг сварочной ванны было основным источником трудностей, снижающих ненадежность обнаружения дефектов, что и должно учитываться при контроле сварки ультразвуковыми средствами [4].

Подшипники скольжения, выступающие в качестве критически важных опорных компонентов во вращающихся машинах, часто работают, катаясь на сверхтонкой масляной пленке. Разрыв этой масляной пленки может вызвать износ мягкого покрытия подшипника и даже привести к катастрофическим отказам. Благодаря анализу характера распространения ультразвуковой волны в изношенном подшипнике установлено, что форма эхо-сигнала остается независимой от глубины износа, но коррелирует с изменениями времени распространения ультразвукового сигнала [5].

Необходимость выявления источников ультразвука и их анализа сигналов на наличие диагностических признаков обусловлена важностью раннего обнаружения потенциальных проблем в различных системах. Ультразвук может служить индикатором неисправностей, таких как утечки газов, механические повреждения или износ оборудования. Эффективный анализ ультразвуковых сигналов позволяет не только диагностировать текущее состояние объектов, но и предсказывать возможные неисправности, что способствует повышению надежности и безопасности эксплуатации техники.

Использование ультразвуковой технологии оказалось весьма перспективным для разложения стойких органических соединений в сточных водах, поскольку было доказано, что это эффективный метод разложения органических отходов на менее токсичные соединения. Приsonoхимическом разрушении загрязняющих веществ в водной фазе происходит несколько реакций, таких как пиролиз внутри пузырька и реакции, связанные с гидроксильными радикалами на границе пузырька и жидкости и/или в объёме самой жидкости [6].

Ультразвук (УЗ) – это упругие колебания, частота которых превышает  $(1,5\text{--}2)\cdot10^4$  Гц (15-20 кГц). Нижняя граница области ультразвуковых частот определяется субъективными свойствами человеческого слуха и является условной, поскольку верхняя граница слухового восприятия человека имеет значительный разброс для различных индивидуумов. Верхняя граница ультразвуковых частот обусловлена физической природой упругих волн, длина волны ультразвука должна быть значительно больше длины свободного пробега молекул в газах или межатомных расстояний в жидкостях и твёрдых телах. Поэтому в газах верхняя граница частот определяется из условия приблизительного равенства длины звуковой волны и длины свободного пробега молекул; что при нормальном давлении составляет около  $10^9$  Гц. В жидкостях и твёрдых телах определяющим является равенство длины волны с межатомным расстоянием, поэтому граничная частота достигает  $10^{12}$  - $10^{13}$  Гц [1].

Распространение ультразвука в теле человека характеризуется определёнными физическими свойствами, такими как скорость и затухание. В различных тканях человеческого тела скорость ультразвука варьируется. В среднем, она составляет около 1540 м/с в мягких тканях, таких как мышцы и жир. В костной ткани скорость может достигать 4000 м/с и более, что связано с высокой плотностью и жесткостью этих тканей.

При прохождении через ткани человеческого тела ультразвук теряет свою интенсивность из-за различных факторов, таких как поглощение, рассеяние и отражение. Затухание зависит от частоты ультразвука и свойств тканей. Высокочастотные ультразвуковые волны затухают быстрее, чем низкочастотные, что ограничивает их проникновение в более глубокие слои тканей. Эти характеристики важны для медицинской диагностики, так как они влияют на качество изображений, получаемых с помощью ультразвуковых методов, таких как ультразвуковая эхография.

Использование ультрасонографии (УЗИ) в отделениях неотложной помощи, интенсивной терапии и кардиологических отделениях становится популярным. Теперь этот метод считается «третьим глазом» врачей в этих отделениях. Этот метод визуализации легко применим непосредственно у постели больного в режиме реального времени и не несет радиационной опасности по сравнению с традиционными методами визуализации легких (рентгенография грудной клетки и компьютерная томография легких) у пациентов в критическом состоянии. Ультразвуковое исследование легких (УЗИ) дополняет традиционные методы оценки и другие методы визуализации легких [7].

Одним из методов оценки функционирования дыхательной системы человека является электромагнитное зондирование, которое основано на существенной разнице диэлектрической проницаемости мышечной ткани и воздуха. Во время дыхания при наполнении легких воздухом диэлектрическая проницаемость легких уменьшается, что приводит к изменению уровня электромагнитного сигнала, проходящего через организм. [8]. При разработке этого метода, было предложено дополнить его ультразвуковыми исследованиями звуков, создаваемых лёгкими в процессе дыхания, но не обнаруживаемые специалистами с помощью стетоскопов.

В работе [9] с помощью массива ультразвуковых микрофонов определялись пространственные параметры ультразвукового поля. Результаты показывают, что точность локализации источников звука была достигнута лучше, чем при локализации звуковых источников, что было проверено как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Появление недорогих ультразвуковых микрофонов (рисунок 1) позволяет создавать недорогие и портативные приборы для локализации ультразвука и измерения его интенсивности.

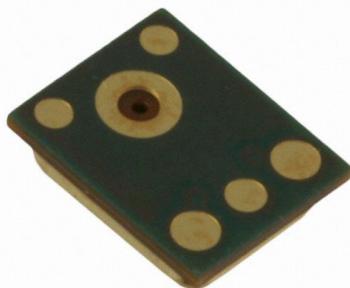


Рис. 1. Микрофон SPU0410LR5H-QB-7

Основные характеристики микрофонов, использованных в созданной установке для регистрации ультразвуковых колебаний, формируемых в лёгких человека в процессе дыхания приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики микрофона SPU0410LR5H-QB-7

Производитель	Knowles
Серия	SiSonic™
Частотный диапазон	100 Гц – 80 кГц
Чувствительность	-38дБ ±3дБ
Тип	MEMS (Кремний)
Отношение сигнал/шум	63 дБ
Импеданс	400 Ом
Степень защиты	нет
Выводы	поверхностный монтаж
Напряжение номинальное	1.5 - 3.6 В
Ток питания	160 мкА
Габариты	3.76 мм x 3.00 мм x 1.23 мм
Тип выходного сигнала	аналоговый
Направленность	всенаправленный

Хорошо известно, что совмещение нескольких мониторинговых систем, например, для контроля звуков и биологических потенциалов позволяет получать новые данные для диагностики функционирования организма [10, 11, 12].

Проведение исследований на основе измерений ультразвуковых сигналов различной природы требует наличие аналого-цифрового преобразователя (АЦП), способного принимать и обрабатывать сигналы ультразвукового. Для решения этой задачи был использован АЦП, разработанный в специальном конструкторско-технологическом бюро «Гранит» для применения в радиолокаторе П-18К. На рисунке 2 представлен четырёхканальный АЦП, установленный в приёмном устройстве радиолокатора.

АЦП выполнен на базе четырёх микросхем AD7641BSTZ, работающих синхронно.

Технические характеристики АЦП:

Количество каналов – 2 шт.;

Диапазон входных напряжений – от -1.85 В до +1.85 В;

Входное сопротивление канала – не менее 1 МОм;

Частотный диапазон – от 0 до 250 кГц.

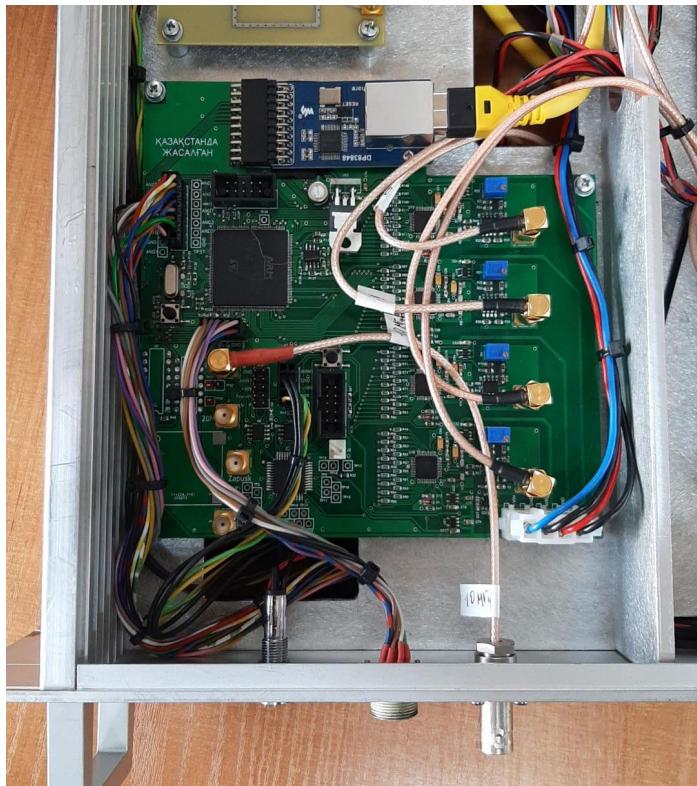


Рис. 2. Разработанный четырёхканальный АЦП

### Заключение

Ультразвук неслышен человеку, но его появление может свидетельствовать о проблемах с функционированием организмов и техники. Для исследования диагностических признаков был создан новый прибор для диагностики объектов и локализации проблем.

### Библиографический список

1. Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия// М.: Советская энциклопедия. - 1979. - С. 400
2. МИХЕЛЬСЕН А. ЗВУКОВАЯ КОММУНИКАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВОСПРИЯТИЕ У ЖИВОТНЫХ // Звуковые миры от тела до города: слушайте!. – 2019. – С. 33.
3. Милоевич И., Лемма К., Хосла Р. Использование ультразвука в отделении интенсивной терапии при интервенционных пульмонологических процедурах // Журнал торакальных заболеваний. – 2021. – Т. 13. – №. 8. – С. 5343.
4. Лу Й. Обнаружение дефектов в сварных швах в реальном времени с помощью ультразвуковых методов : дис. – Брунельский университет, Школа инженерии и дизайна, докторские диссертации, 1992.
5. Доу П. и др. Ультразвук позволил одновременно измерить глубину износа покрытия и толщину смазочной пленки в подшипнике скольжения // Измерения. – 2025. – Т. 240. – С. 115602.
6. У Т.Я. и др. Теория и основы ультразвука // Достижения в области ультразвуковых технологий для восстановления окружающей среды. – 2013. – С. 5-12.
7. Сараоги А. Ультразвуковое исследование легких: настоящее и будущее // Lung India. – 2015. – Т. 32. – №. 3. – С. 250-257.
8. Vassilyev I., Mendakulov Z. Electromagnetic Imaging for Breathing Monitoring // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – №. 23. – PP. 7722.
9. Пулкки В., МакКормак Л., Гонсалес Р. Технология сверхчеловеческого пространственного слуха для ультразвуковых частот // Научные отчеты. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 11608..
10. Мун К.С., Ли С.К. Носимая мультимодальная беспроводная сенсорная система для мониторинга и анализа дыхания // Датчики. – 2023. – Т. 23. – №. 15. – С. 6790.
11. Хао И., Фостер Р. Беспроводные сети датчиков тела для мониторинга здоровья // Физиологические измерения. – 2008. – Т. 29. – №. 11. – С. R27.
12. Чан М. и др. Интеллектуальные носимые системы: текущее состояние и будущие проблемы // Искусственный интеллект в медицине. – 2012. – Т. 56. – №. 3. – С. 137-156.

УДК 681.883; ГРНТИ 47.55.31

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ОПАСНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А. Рысбекова

АО «Академия гражданской авиации» Ахметова 44, 050039,  
г. Алматы, Республика Казахстан, ainara\_18.90@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются опасные для человека аспекты воздействия ультразвуковых сигналов большой мощности. Приведены данные об особенностях распространения ультразвука в биологических тканях и информация о методах и устройствах локализации звуковых и ультразвуковых сигналов. Данная информация о новом экспериментальном четырёхканальном устройстве для регистрации звуковых и ультразвуковых сигналов.

**Ключевые слова:** звук, здоровье, локализация, микрофон, опасность, ультразвук.

## LOCALIZATION OF SOURCES OF DANGEROUS ULTRASONIC RADIATION

A.A. Rysbekova

JSC "Academy of Civil Aviation" Akhmetov 44, 050039,  
Almaty, Republic of Kazakhstan, ainara\_18.90@mail.ru

**Abstract.** The paper considers the human-threatening aspects of exposure to high-power ultrasonic signals. Data on the peculiarities of ultrasound propagation in biological tissues and information on methods and devices for localization of sound and ultrasound signals are presented. Information is given about a new experimental four-channel device for recording sound and ultrasonic signals.

**Keywords:** sound, health, localization, microphone, danger, ultrasound.

### Введение

С развитием технологий ультразвук превратился в портативный и удобный инструмент для диагностики технического состояния машин и оборудования правительства [1]. Применение ультразвуковой технологии в области очистки сточных вод и восстановления окружающей среды потребовало создания генераторов ультразвукового излучения большой мощности. Ультразвуковое воздействие стало эффективным методом для разложения органических отходов на менее токсичные соединения [2].

Расширились и области применения ультразвука, например – контроль дорожного движения [3], а также измерение скорости и направления ветра [4]. Ультразвуковое исследование (УЗИ) произвело революцию в практике ультразвуковой диагностики, постоянно расширяя сферу применения [5].

Основные механические эффекты ультразвука возникают, когда мощность воздействия на среду достаточно высока, чтобы вызвать кавитацию. Кавитационные пузырьки растут во время фазы их расширения и потом «схлопываются» порождая ультразвуковые волны. Эффективность ультразвука как инструмента для обработки пищевых продуктов была доказана в лабораторных условиях [6]. Выявлено влияние ультразвука высокой интенсивности на пенообразующие и эмульгирующие свойства воды при приготовлении пищи. Результаты показали, что растворимость и плотность белка не были затронуты ультразвуком [7].

Но, с расширением сфер применения ультразвука, возросло и понимание его опасности для человека. Защита от ненадлежащего или опасного воздействия ультразвука контролируется международными стандартами и национальными правилами. Стандарт IEC 60601 часть 1 устанавливает требования к механической, электрической, химической и термической безопасности для всего электромедицинского оборудования. Соответствующий стандарт часть 2 для диагностического медицинского ультразвукового оборудования не устанавливает верхних пределов воздействия ультразвука [8].

Ещё в 1920-х годах доступность пьезоэлектрических материалов сделало возможным создание ультразвука (УЗ) в воде с высокими энергиями, так что его можно было обнаружить при распространении на большие расстояния [9].

Ультразвуковые волны — это механические колебания с частотой более 20 000 Гц. Ультразвуковые волны излучаются устройствами, которые используются в промышленности или имеют медицинское или эстетическое назначение. Эксперименты на животных показали возможность повреждения внутренних органов от воздействия ультразвука. В работе [10] была подчеркнута необходимость проведения дополнительных исследований ультразвуковых излучений, чтобы определить, как эта энергия может повлиять на людей, рассчитав максимальную дозу воздействия и разработав руководства по использованию оборудования, излучающего ультразвук, для защиты здоровья.

Новые исследования показывают, что население подвергается воздействию ультразвука, не подозревая об этом. Существующие руководящие документы относятся только к профессиональному воздействию (когда работники знают о воздействии, могут контролировать его и могут использовать защиту). Существующие руководящие принципы основаны на недостаточной доказательной базе, большая часть которой была собрана более 40 лет назад. Исследователи уже тогда считали её недостаточной для окончательной доработки руководящих принципов, но они создали «предварительные» руководящие принципы. Доказательная база была настолько мала, что лишь немногие отчёты исследователей продвинулись от анекдотов до тематических исследований, до формальных научных контролируемых испытаний и эпидемиологических исследований. Ранние исследования сообщали об изменениях порога слышимости, тошноте, головной боли, усталости, мигрени и шуме в ушах. Но было недостаточно исследований на людях и недостаточно измерений, чтобы оценить, какой риск для здоровья может вызвать текущее профессиональное и общественное воздействие ультразвука [11].

Мощный ультразвук обычно выше  $0,1 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , а его частота составляет от 16 до 100 кГц. Мощный ультразвук широко используется в ультразвуковой пайке пластика и сварке металла, ультразвуковой обработке, ультразвуковом разрушении клеток, ультразвуковой экстракции, ультразвуковой резке, ультразвуковом сверлении и других ультразвуковых применениях высокой интенсивности, где требуется высокая величина механического смещения, а также при формировании металла в твердых телах и очистке, распылении, эмульгировании и диспергировании, дегазации иsonoхимических реакциях в жидкостях. В последние годы вновь появился интерес к ультразвуковой обработке, особенно в тех секторах, где ультразвуковая энергия может представлять собой чистый и эффективный инструмент, например, в пищевой промышленности, охране окружающей среды, фармацевтике, производстве химикатов [12].

Длительное воздействие ультразвука на рабочем месте может оказать пагубное влияние на здоровье работника. Учитывая постоянно растущее использование ультразвукового промышленного оборудования, крайне важно контролировать воздействие ультразвука в течение обычного рабочего дня на рабочем месте. Однако используемые в настоящее время устройства имеют ограничения как по рабочей частоте, так и по портативности (носимости) [13].

Ультразвук — это форма механической энергии, частоты которой превышают диапазон человеческого слуха (20 кГц). Среди самых ранних известных источников ультразвука — те, что исходят из животного мира. Собаки, птицы, сверчки и летучие мыши входят в число тех существ, чьи сигналы общения выходят за пределы диапазона человеческого слуха. Кроме того, летучие мыши используют ультразвук в качестве системы наведения в диапазоне от 50 до 100 кГц. Считается, что этот последний факт был впервые постулирован итальянским ученым Спалланцани в 1794 году (Health and Welfare 1980a) [14].

В современных ультразвуковых аппаратах появились новые технологические возможности, такие как тканевая гармоническая визуализация, панорамная визуализация, кодированные импульсы, механическое и матричное 4D-ультразвуковое исследование и эластография [15].

Скорость распространения УЗ и его затухание являются двумя наиболее важными параметрами. Ультразвуковое оборудование для визуализации биологических процессов разрабатывают на основе предпосылки, что ультразвуковая энергия распространяется через ткань по прямой линии, а ультразвуковой луч очень узкий [16]. Затухание ультразвуковых сигналов в диапазоне частот 1–7 МГц и скорость звука были определены экспериментально как в свежих, так и в фиксированных мягких тканях крупного рогатого скота и человека при различных температурах в диапазоне 5–65°C. По мере снижения частоты температурный коэффициент затухания постепенно уменьшается до тех пор, пока после прохождения переходной частоты (она варьируется в зависимости от образцов ткани, но составляет около 1–2 МГц) не начинает увеличиваться [17]. Все эти особенности распространения ультразвука необходимо учитывать при создании диагностических медицинских приборов. Для ультразвуковых сигналов высокой амплитуды наблюдается нелинейное распространение ультразвука, генерация гармонических частот и повышенное затухание [18].

Появление недорогих ультразвуковых микрофонов [19] привело к созданию недорогих и портативных приборов для локализации ультразвука и измерения его интенсивности [20].

Локализация звука - это область обработки сигналов, которая занимается определением источника обнаруженного звукового сигнала. Она включает определение направления и расстояния до источника звука. Экспериментальная установка, описанная в работе [21] требует использования микрофонных решёток, которые регистрируют звуковой сигнал. Некоторые методы подразумевают использование специальных решёток микрофонов из-за их продемонстрированных преимуществ по сравнению с другими решётками. В этом исследовательском проекте были изучены существующие методы локализации звука для анализа преимуществ и недостатков каждого метода. Была сформулирована новая процедура локализации звука, которая использует как направление прибытия (DOA) звукового сигнала, так и оценку местоположения в трехмерном пространстве для точного определения местоположения источника звука. Экспериментальная установка состояла из четырех микрофонов. Ранее источник звука локализовался с помощью шести или более микрофонов. Средняя точность локализации составила 96,77% с коэффициентом погрешности 3,8%.

Массив микрофонов имеет ряд преимуществ по сравнению с системой с одним микрофоном. Он может быть электронно направлен для приёма сигнала из желаемого местоположения источника, одновременно ослабляя помехи от мешающих говорящих и окружающего шума [22]. В приведённой статье рассматривается конкретное применение алгоритмов локализации источника для оценки положения источников речи в реальной среде помещения с учётом ограниченных вычислительных ресурсов. Представлены теоретические основы системы локализации источников речи.

В статье [23] описана система, которая использует беспроводные сетевые и микрофонные интерфейсы мобильных устройств для определения местоположения с точностью до комнаты. Используется ультразвуковой маяк, который позволяет определять местоположение в пределах физической комнаты. Было показано, что ультразвуковое обнаружение надежно даже в шумных средах с большим количеством отражающих поверхностей; и что можно правильно определить комнату с источником ультразвука в течение нескольких секунд с высокой вероятностью, даже если ПК, излучающие ультразвук, не синхронизированы.

Для регистрации и локализации ультразвука в Специальном конструкторско-технологическом бюро (СКТБ) «Гранит» (г. Алматы, Казахстан) была разработана ультразвуковая акустическая фазированная решётка из 4 микрофонов (рисунок 1). Устройство позволяет принимать акустические сигналы в диапазоне частот от 100 Гц до 80 кГц.

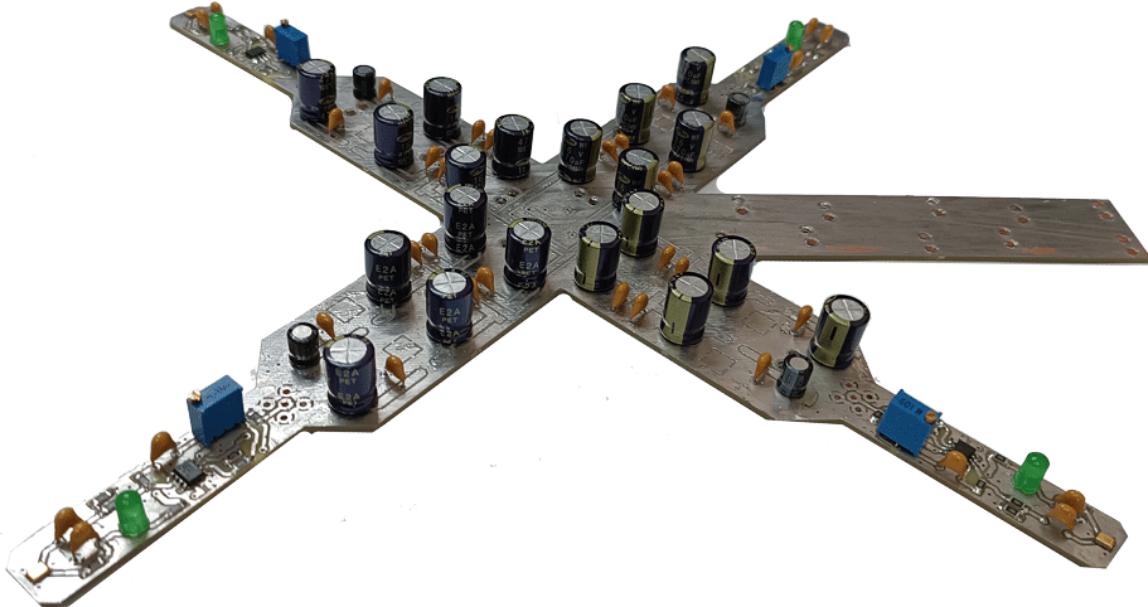


Рис. 1. Ультразвуковая акустическая фазированная решётка

Расстояния между микрофонами составляет около 20 см. Сигналы с ультразвуковых микрофонов будут оцифровываться с использованием четырёхканального синхронного 18-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), разработанный в ТОО СКТБ «Гранит» для применения в радиолокационных станциях П-18К, имеющего тактовую частоту 500 кГц.

### Заключение

Ультразвук неслышен человеку, но может принести вред человеческому организму.

Появление недорогих широкополосных микрофонов и многоканальных АЦП с большим динамическим диапазоном позволяет создавать новые приборы для мониторинга источников ультразвука и локализации их местонахождения.

### Библиографический список

1. Newman P.G., Rozycki G.S. THE HISTORY OF ULTRASOUND // Surgical Clinics of North America. 1998. Vol. 78(2). PP. 179-195.
2. Wu T.Y., Guo N., Teh C.Y., Hay J.X.W. Theory and Fundamentals of Ultrasound // In: Advances in Ultrasound Technology for Environmental Remediation. SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Dordrecht. 2013.
3. Jo Y, Choi J, Jung I. Traffic Information Acquisition System with Ultrasonic Sensors in Wireless Sensor Networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2014. Vol. 10(5).
4. Bucci, G., Ciancetta, F., Fiorucci, E., Gallo, D., Landi C., Luiso, M. A low-cost ultrasonic wind speed and direction measurement system // 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Minneapolis, MN, USA. 2013. PP. 505-510.
5. Harvey C.J., et al. Advances in Ultrasound // Clinical Radiology. 2002. Vol. 57(3). PP. 157-177.
6. Mason T.J., Riera E., Vercet A., Lopez-Buesa P. 13 - Application of Ultrasound // Emerging Technologies for Food Processing, Academic Press. 2005. PP. 323-351.
7. Meurer M.C., Souza D., Damasceno L., Marczak F. Effects of ultrasound on technological properties of chickpea cooking water (aquafaba) // Journal of Food Engineering. 2020. Vol. 265, 109688.
8. Duck F.A. Medical and non-medical protection standards for ultrasound and infrasound // Progress in Biophysics and Molecular Biology. 2007. Vol. 93(1-3). PP. 176-191.
9. Nyborg W.L. Biological effects of ultrasound: Development of safety guidelines. Part II: General review // Ultrasound in Medicine & Biology. 2001. Vol. 27(3). PP. 301-333.
10. Moyano D.B., Paraiso D.A., González-Lezcano R.A. Possible Effects on Health of Ultrasound Exposure, Risk Factors in the Work Environment and Occupational Safety Review // Healthcare. 2022. Vol. 10(3). 423.

11. Leighton T.G. Are some people suffering as a result of increasing mass exposure of the public to ultrasound in air? // Proc. R. Soc. A. 2016. Vol. 472. 2185.
12. Yao Y., Pan Y. Liu S. Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 62. 104722.
13. Cieslak M., Kling C., Wolff, A. Development of a Personal Ultrasound Exposimeter for Occupational Health Monitoring // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18(24). 13289.
14. Benwell D.A., Bly S.H.P. Sources and Applications of Ultrasound // Ultrasound. Springer, Boston, MA. 1987.
15. Starkoff B. Ultrasound physical principles in today's technology // Australasian Journal of Ultrasound in Medicine. 2014. 17: 4-10.
16. Kossoff G. Basic Physics and Imaging Characteristics of Ultrasound // World J. Surg. 2000. 24: 134-142.
17. Bamber J.C., Hill C.R. Ultrasonic attenuation and propagation speed in mammalian tissues as a function of temperature // Ultrasound in Medicine & Biology. 1979. Vol. 5(2) Issue 2. PP. 149-157.
18. Humphrey V.F. Ultrasound and matter—Physical interactions // Progress in Biophysics and Molecular Biology. 2007. Vol. 93(1-3). PP. 195-211.
19. Knowles SPU0410LR5H-QB-7. Available online: URL: <https://t-way.ru/catalog/audioproducts/microphones/spu0410lr5hqb7>. Accessed 23 February 2025.
20. Pulkki V., McCormack L. Gonzalez R. Superhuman spatial hearing technology for ultrasonic frequencies // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. 11608.
21. Liaquat M. U., Munawar H. S., Rahman A., Qadir Z., Kouzani A. Z. Mahmud, M. A. P. Sound Localization for Ad-Hoc Microphone Arrays // Energies. 2021. Vol. 14(12). 3446.
22. Brandstein M.S., Silverman H.F. A practical methodology for speech source localization with microphone arrays // Computer Speech & Language. 1997. Vol. 11(2). PP. 91-126.
23. Borriello G., Liu A., Offer T., Palistrant C., Sharp R. WALRUS: wireless acoustic location with room-level resolution using ultrasound // In Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '05). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2005. PP. 191–203.

УДК 004.93'1, 159.942.33; ГРНТИ 28.23.15, 15.01.77

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МУЗЫКИ НА ЭМОЦИИ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МИКРОВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА

О.В. Мельник, В.А. Саблина, Н.В. Яковлев

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Россия, Рязань, sabrina.v.a@evm.rsreu.ru

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы формирования наборов данных микровыражений лица и различные подходы к ее решению. Представлен краткий теоретический обзор существующих исследований влияния музыки на эмоции человека. Обоснован выбор музыки в качестве эмоционального стимула для проведения экспериментального исследования. Целью исследования являлась оценка возможности формирования набора данных микровыражений лица с помощью музыкальных стимулов. Описаны основные этапы эксперимента по формированию последовательностей изображений с микровыражениями лица, возникающими при прослушивании выбранных музыкальных отрывков, с помощью высокоскоростной камеры. Анализ результатов эксперимента подтвердил влияние музыки на эмоции человека, проявляющееся в форме макровыражений и микровыражений лица.

**Ключевые слова:** микровыражения лица, эмоции человека, музыкальные стимулы, наборы данных микровыражений, высокоскоростная камера, последовательности изображений, психологические эксперименты.

## AN INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE MUSIC ON HUMAN EMOTIONS BASED ON FACIAL MICRO-EXPRESSION ANALYSIS

O.V. Melnik, V.A. Sablina, N.V. Iakovlev

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, sabrina.v.a@evm.rsreu.ru

**Abstract.** The problem of the creation of facial micro-expression datasets and different approaches to its solution are considered. A brief theoretical overview of existing investigations of the influence of the music on human emotions is represented. The selection of music as an emotional stimulus for carrying out an experimental investigation is justified. The goal of the investigation was

the assessment of the possibility of the creation of the facial micro-expression datasets using musical stimuli. The main stages of the experiment on the creation of the image sequences with the facial micro-expressions arising while listening to the selected musical excerpts using the high-speed camera are described. The analysis of the experimental results confirmed the influence of the music on human emotions manifesting in the form of facial macro-expressions and micro-expressions.

**Keywords:** facial micro-expressions, human emotions, musical stimuli, micro-expression datasets, high-speed camera, image sequences, psychological experiments.

## Введение

Эмоции человека проявляются на его лице в виде различных выражений, которые разделяют по длительности на макровыражения и микровыражения. Макровыражения обычно делятся от половины секунды до четырех секунд, а микровыражения – менее половины секунды. Микровыражения появляются неосознанно в случаях, когда человек пытается скрыть свои истинные эмоции. Обычно они незаметны для человеческого глаза в силу своей непродолжительности [1].

Направление анализа микровыражений лица с использованием технологий технического зрения получило развитие в последние пятнадцать лет. Однако исследования затруднены из-за сложностей получения наборов данных и их анализа ввиду того, что микровыражения едва различимы и требуют особых условий для возникновения. Изначально в психологических экспериментах пытались воздействовать актеров, однако оказалось, что микровыражения появляются только как проявления истинных эмоций, то есть независимо от желания человека. Другим подходом является демонстрация участникам эксперимента статичных изображений или видеопоследовательностей, однако одним из наиболее простых и легко реализуемых на практике способов вызвать ту или иную эмоцию является прослушивание музыки. Эмоциональное воздействие музыки изучается на протяжении длительного времени. При этом выделяют «когнитивистский» и «эмотивистский» подходы. Когнитивисты считают, что музыка искусственно «моделирует» эмоции, а эмотивисты придерживаются мнения, что вызываемые музыкой эмоции вполне реальны [2]. В любом случае музыку можно считать сильным эмоциональным стимулом. Исследователи предлагают использовать ее как средство эмоциональной регуляции психической активности человека и развития способностей распознавать свои эмоции и управлять ими [3].

## Влияние музыки на эмоции человека

Одним из наиболее известных когнитивных психологов, изучающих влияние музыки на эмоции человека, является Даниэль Вестфельл. Согласно его исследованиям музыка может вызывать глубокие эмоции у слушателей, а также настроения, представляющие собой достаточно длительные эмоциональные процессы [4]. В [5] исследователи, в том числе опираясь на результаты Даниэля Вестфельла, описывают проведенный эксперимент, целью которого было определить, насколько долго сохраняются эмоциональные состояния, вызываемые музыкой. Для этого участники эксперимента прослушивали музыкальные отрывки, которые были разделены на нейтральные, позитивные и негативные. Затем участники сообщали об испытываемых после прослушивания эмоциях, кроме этого, фиксировались их сердечные и электродермальные реакции. Полученные результаты свидетельствуют, что позитивные и негативные музыкальные отрывки вызывали у слушателей эмоции счастья и печали соответственно. При этом субъективно участники отмечали сохранение этих эмоций в течение примерно 2 минут, а объективно по регистрируемым параметрам можно предположить даже более длительное воздействие.

В другом исследовании участники эксперимента также прослушивали приятную, неприятную и нейтральную музыку, кроме этого, в качестве четвертого стимула было добавле-

но отсутствие музыки [6]. Затем анализировались электроэнцефалограммы участников, и результаты сравнивались с субъективными описаниями собственных эмоциональных состояний. Результаты этого исследования также подтвердили, что музыка способна вызывать эмоциональный отклик у слушателя.

Еще в одной научной работе проводилось сравнение воздействий значимой и приятной музыки на слушателей. По результатам этого исследования был сделан вывод, что как значимая, так и приятная музыка способны вызывать широкий диапазон эмоций различной интенсивности [7].

Таким образом, многочисленные научные исследования обнаруживают влияние музыки на эмоции человека и подтверждают возможность применения музыки в качестве средства, способного легко вызвать у человека различные эмоции. Поэтому для проведения эксперимента именно музыка была выбрана в качестве эмоционального стимула, влияние которого исследовалось с помощью анализа микровыражений лица слушателя.

### **Описание экспериментального исследования**

Целью нашего экспериментального исследования являлась оценка возможности формирования набора данных микровыражений лица с помощью музыкальных стимулов. Хотя, как отмечено выше, множество исследований было посвящено исследованию связи между музыкой и эмоциями, однако, как правило, в них рассматривались только макровыражения или другие проявления эмоций, а микровыражения не анализировались.

Потребность формирования собственного набора данных микровыражений лица следует из того факта, что имеющиеся в настоящее время подобные наборы данных очень немногочисленны. Одним из лучших считается набор данных спонтанных действий и микроДвижений Spontaneous Actions and Micro-Movements (SAMM) [8]. Однако набор SAMM содержит только 159 микровыражений, представленных последовательностями изображений.

Эксперимент состоял из следующих основных этапов: выбор музыки, выбор участников, установка оборудования для прослушивания музыки и видеосъемки лица, непосредственно выполнение прослушивания и видеосъемки для каждого вида музыки и участника, обработка и анализ результатов.

На первом этапе эксперимента производился выбор музыки. Изначально рассматривался вариант использования стандартного набора музыкальных отрывков из классических произведений, общего для всех участников. Однако в дальнейшем было решено производить выбор исходя из субъективных предпочтений участников эксперимента, поскольку, например, у одного участника рок-баллада группы Scorpions «Still Loving You» может вызывать грусть, а композиция композитора Эдварда Грига «В пещере горного короля» – радость, а у другого участника – совсем другие эмоции. Таким образом, для каждого участника было подобрано четыре вида стимулов: отсутствие музыки, нейтральная музыка, радостная музыка и грустная музыка.

В эксперименте добровольно участвовали 5 человек различных пола и возраста. Каждый из них самостоятельно выбрал для себя одну композицию каждого вида.

Эксперимент проводился в лаборатории Центра практической психологии ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России. Для прослушивания музыки использовался обычный персональный компьютер. Для видеосъемки микровыражений лица использовалось специальное оборудование – высокоскоростная камера GoPro HERO 13 Black, запись производилась с частотой 240 кадров в секунду и разрешением FullHD.

Перед участниками эксперимента была поставлена следующая задача: неподвижно смотреть прямо в камеру во время прослушивания музыки и видеосъемки. Это необходимо, чтобы зафиксировать именно микровыражения лица, а не макровыражения. Микровыражения появляются, когда человек пытается скрыть свои эмоции. Запись выполнялась последовательно для каждого вида стимула в течение 20 секунд с перерывами между стимулами. Запись включалась через некоторое время после начала композиции и осуществлялась одновременно с продолжением прослушивания музыкального отрывка. Участники эксперимента

сообщили о субъективном возникновении у них эмоций при прослушивании выбранной музыки.

На завершающем этапе полученные видеофрагменты сначала были размечены вручную, а затем обработаны программным путем. Разметка заключалась в просмотре кадр за кадром полученных видеопоследовательностей и обнаружении на них выражений лица. Выбранные кадры, отражающие возникновение и угасание выражения лица длительностью половина секунды, были сохранены отдельно в виде последовательностей из 121 изображения для каждого выражения. В результате было отмечено возникновение выражений лица у каждого участника эксперимента при прослушивании музыки, а без музыки каких-либо движений на лицах обнаружено не было, кроме моргания, которое не относится к микровыражениям. Поэтому без музыки для исследования были выбраны произвольные последовательности из 121 изображения длительностью половина секунды. На рисунке 1 представлен пример полученной указанным образом последовательности изображений для одного из участников эксперимента для случая прослушивания выбранной радостной музыки.

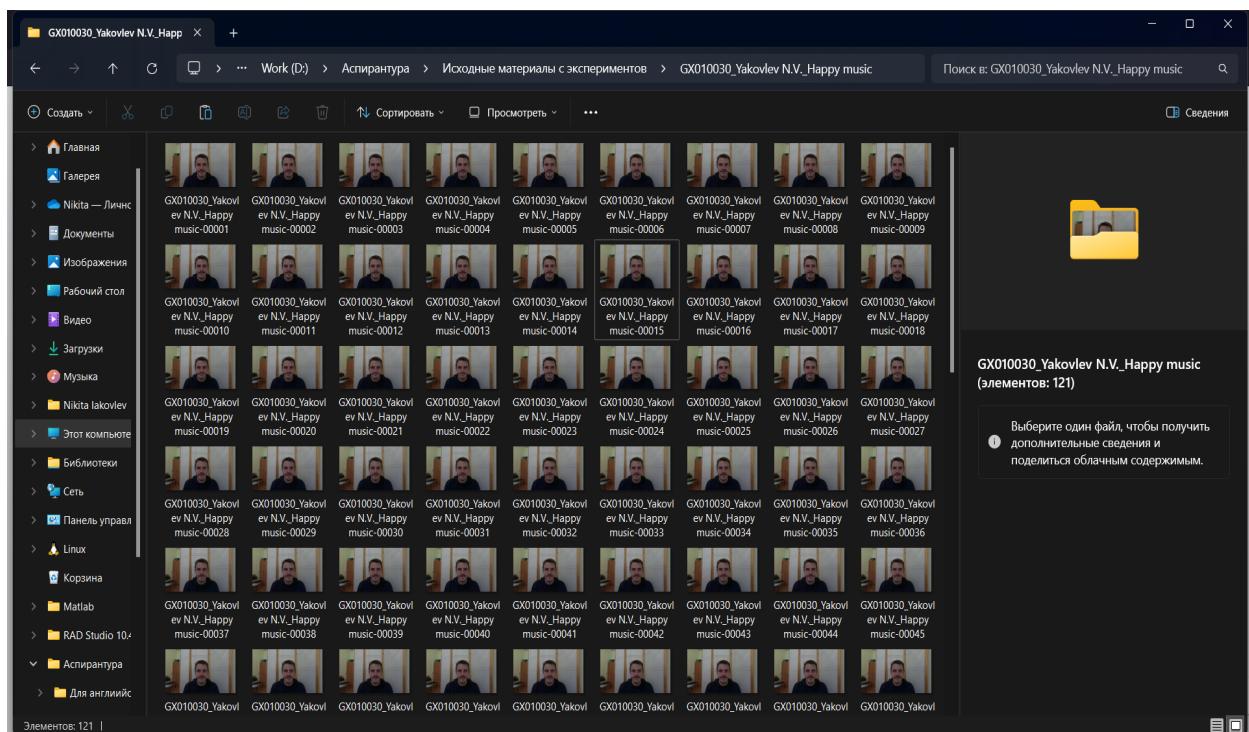


Рис. 1. Пример последовательности изображений, отражающей возникновение и угасание выражения лица

На рисунке 2 представлены примеры полученных изображений лица с нейтральным выражением и с радостным выражением для одного из участников эксперимента. Для дальнейшего анализа использовалась технология обнаружения микролицевых движений для выявления истинных эмоций человека, предложенная в [9]. Технология позволяет автоматизировать процесс обнаружения микролицевых движений на последовательности изображений путем применения специализированных программных средств [10].

Применение указанной технологии позволило удостовериться, что на последовательностях изображений, полученных без музыкального стимула, были обнаружены только немногочисленные движения антропометрических точек в областях возможного возникновения микровыражений лица. Поэтому можно считать соответствующие выражения лица нейтральными. В то же время анализ последовательностей изображений, полученных при прослушивании, например, музыки, субъективно воспринимаемой, как радостная, показал, что более половины рассматриваемых антропометрических точек были задействованы в движе-

ниях. Кроме того, эти движения происходили преимущественно в областях, соответствующих как раз выражению эмоции радости.



Рис. 2. Примеры изображений лица участника эксперимента:  
а) – нейтральное выражение лица; б) – радостное выражение лица

Таким образом, подтверждается влияние музыки на эмоции человека и возможность их проявления в форме микровыражений лица. В то же время стоит отметить, что полная длительность обнаруженных выражений преимущественно превышала половину секунды, то есть такие выражения можно отнести уже к макровыражениям, хотя и слабой интенсивности. Также в ходе эксперимента было замечено, что возникающие эмоции сохраняются в течение некоторого времени после окончания прослушивания вызывающей их музыки, что согласуется с результатами, представленными в [5].

### **Заключение**

Анализ результатов эксперимента подтвердил влияние музыки на эмоции человека, в том числе проявляющееся в форме выражений лица, а именно в форме как макровыражений, так и микровыражений. Микровыражения могут появляться, когда человек тщательно пытается скрыть возникающие эмоции.

Исследование показало возможность формирования набора данных микровыражений лица с помощью музыкальных стимулов. В дальнейшем предполагается развитие экспериментальных исследований в этом направлении: рассмотрение более широкого спектра базовых эмоций человека, увеличение количества участников эксперимента, формирование общего для всех участников списка музыкальных композиций.

Также возможно включение в число участников эксперимента людей с психологическими особенностями, такими как депрессивное и тревожное расстройства, для сравнения возникающих у них выражений и соответствующих им эмоций с контрольной группой. В перспективе результаты таких исследований могут использоваться для более быстрой диагностики подобных расстройств психологами на основе анализа микровыражений лица.

### **Библиографический список**

1. Paul Ekman, *Emotion in the Human Face*, 2<sup>nd</sup> Edition, Malor Books, 2013, 456 p.
2. Music and Emotions. Wikipedia, the Free Encyclopedia [Электронный ресурс]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Music\\_and\\_emotion](https://en.wikipedia.org/wiki/Music_and_emotion) (дата обращения: 12.03.2025).
3. Фомин А.В., Зотова М.А. Воздействие музыки на психоэмоциональное состояние человека и его творческий потенциал как компонент содержания музыкально-педагогического образования // Научный журнал кафедры ЮНЕСКО «Музыкальное искусство и образование на протяжении жизни», № 2 (22), 2018. – С. 59-75.
4. Daniel Västfjäll, *Emotion Induction through Music: A Review of the Musical Mood Induction Procedure*, *Musicae Scientiae Journal*, Volume 5, Special Issue 2001-2002, pp. 173-211.
5. Fabiana Silva Ribeiro, Flávia Heloísa Santos, Pedro Barbas Albuquerque, and Patrícia Oliveira-Silva, *Emotional Induction Through Music: Measuring Cardiac and Electrodermal Responses of Emotional States and Their Persistence*, *Frontiers in Psychology Journal*, *Emotion Science Section*, Volume 10, Number 451, 2019, 13 p.

6. Hussain-Abdulah Arjmand, Jesper Hohagen, Bryan Paton, and Nikki S. Rickard, Emotional Responses to Music: Shifts in Frontal Brain Asymmetry Mark Periods of Musical Change, *Frontiers in Psychology Journal, Auditory Cognitive Neuroscience Section*, Volume 8, Number 2044, 2017, 13 p.
7. Rebecca N.H. de Leeuw, Sophie H. Janicke-Bowles, and Qihao Ji, How Music Awakens the Heart: An Experimental Study on Music, Emotions, and Connectedness, *Mass Communication and Society*, Volume 25, Issue 5, 2021, pp. 626-648.
8. Adrian K. Davison, Cliff Lansley, Nicholas Costen, Kevin Tan, Moi Hoon Yap, "SAMM: A Spontaneous Micro-Facial Movement Dataset," in *IEEE Transactions on Affective Computing*, Volume 9, No. 1, 2018, pp. 116-129.
9. Саблина В.А. Технология обнаружения микролицевых движений для выявления истинных эмоций человека // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2022: сб. тр. XXXV Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 7-9 декабря 2022 г. / под общ. ред. В.И. Жуlevа. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2022. – С. 11-17.
10. Мельник О.В., Саблина В.А., Черненко А.Д. Программный комплекс для исследования пространственно-временных дескрипторов признаков // Биомедицинская радиоэлектроника, том 27, № 4. – М.: Издательство «Радиотехника», 2024. – С. 48-55.

УДК 616-71; ГРНТИ 76.13.25

## СПОСОБ БЕСКОНТАКТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОЦЕССОВ СЕРДЦЕБИЕНИЯ И ДЫХАНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПОСРЕДСТВОМ ВЕБ-КАМЕР И ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В СРЕДЕ MATLAB

С.А. Матяшина, С.Г. Гуржин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, matyashina02@mail.ru; gurzhin@mail.ru*

**Аннотация.** Предложен полиграфический способ бесконтактной регистрации физиологических процессов сердцебиения и дыхания пациента и его реализация на основе двух веб-камер, персонального компьютера и программных средств в виде виртуальных приборов в среде MATLAB. Рассмотрены основные этапы алгоритма работы системы, позволяющие непрерывно регистрировать видео потоки изображений лица и грудной клетки пациента, выделять из них информативные параметры, формировать осциллограммы и интервалограммы сигналов сердцебиения и дыхания, а также оценивать диагностические показатели, свидетельствующие об опасных изменениях биоритмов.

**Ключевые слова:** видеоплетизмография, веб-камеры, бесконтактная регистрация, физиологические процессы, сигналы сердцебиения и дыхания, интервалограммы сигналов, виртуальные приборы.

## METHOD OF CONTACTLESS REGISTRATION OF HUMAN HEARTBEAT AND BREATHING PROCESSES USING WEB CAMERAS AND VIRTUAL DEVICES IN THE MATLAB ENVIRONMENT

S.A. Matyashina, S.G. Gurzhin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, matyashina02@mail.ru; gurzhin@mail.ru*

**Annotation.** A polygraphic method of contactless recording of physiological processes of heartbeat and respiration of a patient and its implementation based on two webcams, a personal computer and software in the form of virtual devices in the MATLAB environment are proposed. The main stages of the system operation algorithm are considered, allowing continuous recording of video streams of images of the patient's face and chest, extracting informative parameters from them, forming oscilloscopes and intervalograms of heartbeat and respiration signals, and evaluating diagnostic indicators indicating dangerous changes in biorhythms.

**Keywords:** video plethysmography, webcams, contactless recording, physiological processes, heartbeat and respiration signals, intervalograms of signals, virtual devices.

В работе [1] предложена функциональная схема разрабатываемой бесконтактной системы обнаружения опасных нарушений в биоритмах сердцебиения и дыхания пациента. В ее состав входят две **веб-камеры**, персональный компьютер и программные средства в виде

виртуальных приборов в среде MATLAB, с помощью которых может производиться видео регистрация малейших изменений цвета кожи лица человека, вызванных пульсациями крови, и небольших перемещений его грудной клетки.

Целью данной статьи является показать возможность создания бесконтактной системы мониторинга и исследования физиологических процессов, позволяющей в реальном масштабе времени безопасно, объективно, долговременно и автоматически вести наблюдение за текущим состоянием пациента и выявлять опасные нарушения в его биоритмах.

Бесконтактные методы мониторинга становятся все более востребованными, поскольку полностью исключают физические воздействия технических средств на человека и связанные с ними факторы, которые существенно снижают диагностическую точность.

Такие методы особенно эффективны в клинической медицине при проведении сеансов физиотерапии, так, например, в магнитотерапии, когда необходимо оперативно получать информацию об ответных реакциях организма пациента на лечебное воздействие, быстро оценивать его текущее функциональное состояние и вовремя корректировать параметры воздействия и методику лечения.

Сегодня одним из новых и развивающихся диагностических методов является **видеоплетизмография** или **веб-фотоплетизмография** – это метод бесконтактной регистрации жизненно важных физиологических процессов человека, основанный на обработке и анализе видеоизображений участков тела, с последующим измерением информативных параметров зарегистрированных процессов и оперативной оценкой значимых диагностических показателей [2-6].

Основными преимуществами метода являются:

- Отсутствие непосредственного контакта с пациентом и воздействия на него каким-либо физическим фактором, исходящим от веб-камеры;
- Отсутствие необходимости закрепления и позиционирования датчиков на поверхности человека, тщательного контроля их контакта с телом и стерильности;
- Возможность автоматического, непрерывного, долговременного и объективного мониторинга за текущим состоянием человека в реальном масштабе времени;
- Сертифицированный, высокочувствительный, измерительный преобразователь в виде цифровой, цветной веб-камеры высокого разрешения, стандартно сопрягаемой с персональным компьютером через USB разъем.

К недостаткам можно отнести:

- Зависимость от внешнего освещения объекта;
- Влияние непроизвольных двигательных артефактов объекта.

Поскольку метрологические характеристики разрабатываемой системы во многом зависят от характеристик ее аппаратных средств, т.е. первичных измерительных преобразователей, то в качестве них предлагается использовать веб-камеры модели DEXP Chat M100R1. Светочувствительным элементом камеры является цветная RGB матрица CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) или КМОП (комплементарная структура металлоксид-полупроводник) с информационной емкостью 2 мегапикселя, разрешением 1920×1080 и максимальной частотой записи 30 кадров/с (Гц). Веб-камера совместима с ОС Windows, имеет угол обзора 98 градусов, ручную фокусировку и кабель USB 2.0, защищенный ферритовым фильтром от электромагнитных помех, по которому подводится питание +5 В от компьютера и передаются к нему видеоданные. Камера снабжена функцией слежения за лицом человека, позволяющей автоматически удерживать лицо в центре изображения при движениях головы, что существенно снижает погрешность регистрации физиологических процессов.

Другие составляющие погрешности системы обусловлены виртуальными приборами (ВП), т.е. программными средствами, которые планируется реализовать в среде MATLAB. Для качественной разработки ВП и дальнейшего расширения их функциональных возможностей будет использована обширная библиотека программных инструментов **Computer Vision Toolbox**, позволяющая быстро создавать высокоточные и эффективные системы обработки и

анализа изображений и видео с применением методов компьютерного зрения по распознаванию образов и отслеживанию объектов [7].

Предлагается обобщенный алгоритм работы системы (рис. 1), который определяет последовательность преобразований измерительной информации и выделение из нее наиболее значимой по окончании каждого этапа.

На **1 этапе** производится захват и регистрация потока видеозображений лица и грудной клетки обследуемого человека синхронно двумя веб-камерами, а с помощью уже ВП осуществляется выделение интересующих участков тела и отличительных признаков заметных проявлений физиологических процессов сердцебиения и дыхания.

Принцип обнаружения и извлечения ВП информации о **процессе сердцебиения** человека основывается на обработке и анализе изменений контрастности видеозображения кожи в области лба человека в зависимости от интенсивности объемного кровенаполнения капилляров, где наблюдается наибольшее соотношение сигнал-шум [3, 4], обусловленное близостью к поверхности кровеносных сосудов.

Для надежного выделения информации о процессе сердцебиения человека из общего видео потока данных используется физическое свойство **гемоглобина** (белка крови) поглощать падающие на него световые волны преимущественно зеленой части спектра. Поэтому при увеличении объема крови в сосудах уменьшается интенсивность зеленого света, отраженного от кожи лица.

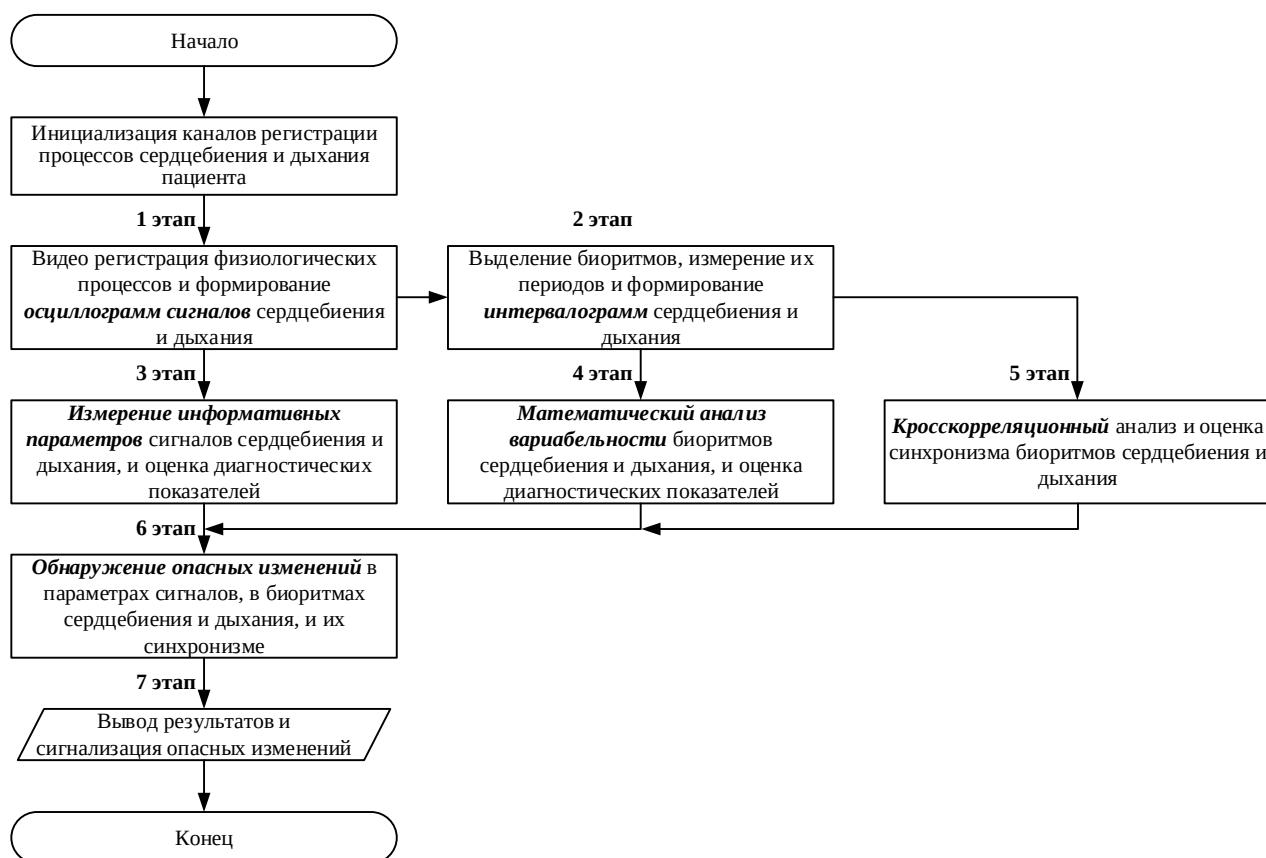


Рис. 1. Обобщенный алгоритм работы бесконтактной системы обнаружения опасных изменений у человека

Учитывая, что веб-камеры, выбранные для разрабатываемой системы, цветные, то они имеют три равноценных канала регистрации световых потоков красный (R), зеленый (G) и голубой (B), которые позволяют независимо и более детально исследовать выбранные участки тела человека в трех диапазонах длин волн.

Регистрируя с помощью веб-камеры, в канале зеленого цвета, изменения контрастности изображения кожи в области лба и проводя фильтрацию видеоданных с помощью ВП

для устранения всевозможных помех, **формируют осцилограмму сигнала сердцебиения**  $f_c(t)$  в виде последовательности цифровых отсчетов из каждого кадра.

Принцип обнаружения и извлечения ВП информации о **процессе дыхания** человека основывается на обработке и анализе перемещений любых элементов его одежды в области грудной клетки, служащих меткой, отслеживание и измерение координат которой, в плоскости матрицы камеры, позволяет **сформировать осцилограмму сигнала дыхания**  $f_d(t)$  в виде последовательности цифровых отсчетов из каждого кадра.

Таким образом, 1 этап заканчивается формированием двух временных функций – сигналов сердцебиения и дыхания обследуемого, которые являются исходной информацией для всех последующих преобразований и методов анализа биомедицинских сигналов.

Используя наборы готовых инструментов MATLAB Toolbox [7], максимально приспособленные для работы с векторами, матрицами, большими объемами и массивами данных в реальном времени, что характерно для решаемой задачи, можно будет эффективно реализовать остальные этапы алгоритма:

- Выделение биоритмов, измерение их периодов и формирование **интервалограмм** сердцебиения и дыхания;
- **Измерение информативных параметров** сигналов сердцебиения и дыхания, и оценка диагностических показателей;
- **Математический анализ вариабельности** биоритмов сердцебиения и дыхания, и оценка диагностических показателей;
- **Кросскорреляционный** анализ и оценка синхронизма биоритмов сердцебиения и дыхания;
- **Обнаружение опасных изменений** в параметрах сигналов, в биоритмах сердцебиения и дыхания, и их синхронизме;
- Вывод результатов и сигнализация опасных изменений.

В качестве индикаторов опасных изменений в биоритмах сердцебиения и дыхания человека предлагается использовать уже известные и апробированные медицинские показатели:

1. **Индекс напряжения (Стресс-индекс или индекс Баевского)**  $IH(SI)$  – показатель ВСР, характеризующий степень напряжения регуляторных систем организма человека [8], очень чувствителен к усилинию тонуса вегетативной нервной системы и может служить индикатором опасных изменений сердечного ритма

$$IH(SI) = \frac{AMo}{2Mo \cdot VR},$$

где  $Mo$  – мода, диапазон значений КИ, наиболее часто встречающихся в динамическом ряду;  $AMo$  – амплитуда моды, отношение количества КИ, со значениями равными  $Mo$ , к общему количеству КИ в %;  $VR$  – вариационный размах, разность максимальных и минимальных значений КИ в динамическом ряду.

2. **Неравномерность ритма дыхания**  $HД$  – показатель, характеризующий степень напряжения работы дыхательного центра [9, 10] за время наблюдения и очень зависящий от интенсивности внешний воздействий

$$HД = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|T_i - T_{i+1}|}{T_i + T_{i+1}} \cdot 100\%,$$

где  $T_i$  – длительность  $i$ -го интервала дыхания (ИД);

$i$  – порядковый номер ИД;

$n$  – число анализируемых ИД.

Исследования показали, что изменения  $HД$  в диапазоне 0-30 % соответствуют норме.

мальным функциональным состояниям организма человека, а изменения в диапазоне 30-70 % близки к опасным жизни состояниям.

3. *Интегральным*, наиболее чувствительным, и точным показателем текущего функционального состояния человека является *уровень стресса*, полученный на основе *кросс-корреляционного* анализа двух одновременно регистрируемых физиологических процессов сердцебиения и дыхания [11, 12], в качестве которого может быть использован показатель силы их корреляционной связи – *корреляционное отношение*

$$\eta_{xy} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 - \bar{\sigma}_{xy}^2}{\sigma_x^2}},$$

где  $x$  – динамический ряд интервалов процесса сердцебиения;

$y$  – динамический ряд интервалов процесса дыхания;

$\sigma_x^2$  – общая дисперсия интервалов сердцебиения при объеме выборки  $n$ ;

$\bar{\sigma}_{xy}^2$  – средняя условная дисперсия интервалов сердцебиения в отдельных сечениях процесса дыхания при объеме выборки  $n$ .

Поскольку корреляционное отношение является неотрицательной величиной и изменяется в пределах от 0 до 1, то силу взаимодействия процессов сердцебиения и дыхания человека оценивают тремя уровнями состояний:

1.  $\eta_{xy} > 0,7$  – связь выраженная, стресс отсутствует, т.е. состояние физиологического покоя;
2.  $0,3 \div 0,7$  – связь средней силы, т.е. стресс среднего уровня;
3.  $\eta_{xy} < 0,3$  – связь слабая, т.е. уровень стресса значительный.

Таким образом, предложен способ бесконтактной системы одновременной регистрации жизненно важных физиологических процессов человека сердцебиения и дыхания. Разработаны структура и алгоритм ее работы на основе применения двух стандартных, сертифицированных веб-камер и оригинальных ВП в среде MATLAB для обнаружения опасных нарушений в биоритмах и оперативной сигнализации угрожающих состояний. На сегодняшний день подобные технические средства очень востребованы, поскольку во многих областях деятельности человека требуются большие психоэмоциональные напряжения, которые провоцируют опасные нарушения основных жизненно важных функций [13]. Особенно такие средства эффективны при наблюдении за пациентами в стационарных и амбулаторных условиях, когда существует высокая вероятность возникновения неблагоприятных изменений в их организмах.

### Библиографический список

1. Матяшина С.А., Гуржин С.Г. Бесконтактная система обнаружения опасных изменений в сердцебиении и дыхании пациента // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2024: сб. тр. XXXVII Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. научных и спец., 4-6 декабря 2024 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2024. – 398 с. С. 230-234.
2. Пуртов К.С., Соколов П.А., Конторович М.Б., Чистяков А.В., Костоусов В.Б., Кубланов В.С. Анализ видеоизображения человека для определения частоты его дыхания // Труды II НТК молодых ученых Уральского энергетического института. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 393-396.
3. Кубланов В.С., Долганов А.Ю., Костоусов В.Б. и др. Биомедицинские сигналы и изображения в цифровом здравоохранении: хранение, обработка и анализ: учебное пособие / под общ. ред. В.С. Кубланова; Мин-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 240 с.

4. Волков И.Ю., Сагайдачный А.А., Фомин А.В. Фотоплетизмографическая визуализация гемодинамики и двухмерная оксиметрия // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика, Вып. 1. Т. 22. 2022. С. 15-45.
5. Семчук И.П. Биотехническая система видеоплетизмографического мониторинга сердечного ритма: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 2.2.12. – Москва, 2022. – 16 с.
6. Гаранин А.А., Рогова В.С., Иванчина П.С., Толкачева Е.О. Веб-фотоплетизмография: возможности и перспективы // Регионарное кровообращение и микроциркуляция, № 4. Т. 22. 2023. С. 11-16.
7. Корк П. Машинное зрение. Основы и алгоритмы с примерами на Matlab / пер. с англ. В.С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 584 с.
8. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. Методические рекомендации // Вестник аритмологии, № 24. 2001. С. 65-83.
9. Вагин Ю.Е. Неравномерность ритма дыхания как показатель эмоционального напряжения // Сеченовский вестник, 2015. № 2(20). С. 13-23.
10. Козырев О.А., Богачев Р.С. Использование математического анализа ритма дыхания для определения вегетативного тонуса // Вестник аритмологии, 1999. №11. С. 23-25.
11. Судаков К.В., Тараканов О.П., Юматов Е.А. Кросскорреляционный вегетативный критерий эмоционального стресса // Физиология человека, № 3. Т. 21. 1995. С. 87-95.
12. Патент РФ №2392848. Способ диагностики стресса у человека / М.М. Лапкин, Р.П. Каравес // Открытия. Изобретения. Опубл. 27.06.2010. Бюл. № 18. – 7 с.
13. Юматов Е.А. Идеология теории функциональных систем в разработке нового класса информационных приборов для охранной сигнализации жизненно важных функций // Вестник новых медицинских технологий, Т. 5. № 1. 1998. С. 19-25.

УДК 617.57-77:681.518.08; ГРНТИ 76.13

## **ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ БИОАДАПТАЦИОННОГО ТРЕНАЖЕРА БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ РУКИ**

**К.С. Ильичева, М.М. Тюрина**

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
Российская Федерация, Казань, ksenia.ilyicheva@yandex.ru*

**Аннотация.** Ежегодно ампутации по разным причинам подвергаются более 1 миллиона человек. Этими причинами могут быть авто- и авиакатастрофы, природные катаклизмы, заболевания. Для возврата утраченных способностей ампутированной верхней конечности люди пользуются бионическими протезами верхних конечностей. Адаптация к этому устройству занимает от полугода и выше. Применение биоадаптивного тренажера позволит пользователю ускорить этот процесс привыкания к протезу и вернуть ему комфортную и повседневную жизнь. Анализ патентных материалов позволил выявить существующие аналоги и способы адаптации к протезу. В статье представлены результаты схемотехнической проработки тренажера для ускоренной адаптации к протезу.

**Ключевые слова:** бионический протез, тренажер, ускоренная адаптация, тактильный канал, чувствительный элемент, тензометрический датчик.

## **FEATURES OF DEVELOPMENT BIOADAPTATION SIMULATOR OF BIONIC PROSTHESIS OF THE HAND**

**K.S. Ilyicheva, M.M. Tyurina**

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI,  
Russia, Kazan, ksenia.ilyicheva@yandex.ru*

**The summary.** Every year, more than 1 million people are amputated for various reasons, including car and airplane accidents, natural disasters and diseases. To regain the lost abilities of the amputated upper limb, people use bionic upper limb prostheses. Adaptation to this device takes from half a year and more. The application of bio-adaptive simulator will allow the user to accelerate this process of adaptation to the prosthesis and return comfortable and everyday life. The analysis of patent materials allowed to identify existing analogs and methods of adaptation to the prosthesis. The article presents the results of circuit engineering development of the simulator for accelerated adaptation to the prosthesis.

**Keywords:** bionic prosthesis, simulator, accelerated adaptation, tactile channel, sensing element, strain gauge sensor.

Современные бионические протезы представляют собой высокотехнологичные устройства, способные эффективно имитировать функции утраченных конечностей. За период 2022-2023 года в протезах нуждались свыше 58 тыс. человек [1]. И в более чем в 80% случаев люди сталкивались с проблемой долгой адаптации к протезу верхней конечности. Однако успешная интеграция таких протезов в жизнь пользователей требует значительной адаптации как физической, так и психологической. Помимо длительного привыкания к протезу, очень много времени уходит на адаптацию и реабилитацию перед самим этапом протезирования.

В настоящее время единственным способом адаптации к бионическим протезам, которым пользуются реабилитационные центры, являются физические тренировки. Существуют конкретные виды упражнений после процесса протезирования, с помощью которых к устройству адаптируются почти все пользователи бионических протезов верхних конечностей. К таким тренировкам приступают только после того, как время использования протеза начнет достигать 8 часов в день. Чаще всего это конкретные повторяющиеся упражнения, к которым относятся: хват (рис. 1, а); перекладывание предмета с одной стороны препятствия (книжка, игрушка, кубик) на другую (рис. 1, б); хват ручки/карандаша; хват бутылки с водой (рис. 1, в) [2].

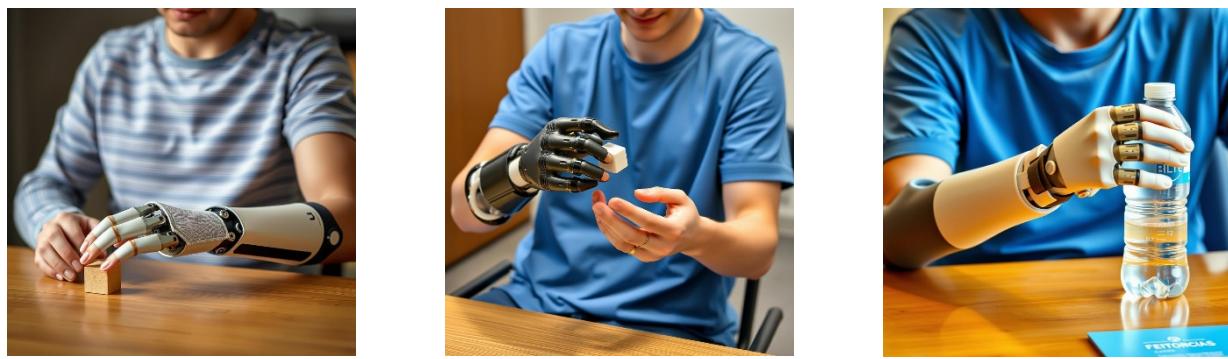


Рис. 1. Пример упражнений с бионическим протезом верхней конечности

Данный способ адаптации является эффективным, но требует значительного времени. Ускорить процесс адаптации и обучения пользователей бионическими протезами возможно с помощью применения биоадаптивного тренажёра, основанного на измерении усилия, приложенного к объекту [3].

Для решения этой задачи был проведен поиск патентных материалов, соответствующих МПК A61F 2/00, A61B5/103, G06F 3/00, G01L 5/00, поскольку разрабатываемое устройство относится к области медицинского приборостроения (протезирование) и используется совместно с бионическими протезами верхних конечностей. За период 2004-2024 гг. (табл. 1) было отобрано 25 патентов, которые позволили оценить технический уровень устройств адаптации к биологическим протезам и выявить современные тренды в разработке.

Таблица 1. Изобретательская активность за указанный период

Показатель	Годы публикаций заявок			
	2004-2008	2009-2013	2014-2018	2019-2024
Количество заявок по годам	5	1	8	11
ИТОГО:	25			

Анализ патентов позволил определить являются две разработки, наиболее близкие по технической сущности к разрабатываемому биоадаптивному тренажеру.

Первая система [4] построена на методе сознательной сенсорной обратной связи для конечности тела без ощущений или протеза конечности тела. Устройство решает вопросы, связанные с отсутствием осознанной сенсорной обратной связи в протезах и частях тела, лишенных ощущений. Данная система включает в себя как минимум один датчик, который должен быть размещен на протезе конечности тела.

Другой вариант системы тактильной обратной связи с сохранением эффекта [5] относится к выводным устройствам для взаимодействия с пользователем и, как правило, может быть использовано в карманных устройствах с сенсорным экраном. Техническим результатом является использование множества параметров низкого уровня для генерирования сохраненных тактильных эффектов. Система тактильной обратной связи включает в себя контроллер, соединенную с контроллером память, схему возбуждения привода, соединенную с контроллером, и привод, соединенный со схемой возбуждения привода. Память хранит в себе, по меньшей мере, один тактильный эффект, который выполняется контроллером, чтобы создать тактильный эффект.

Анализируя данные патенты и остальные найденные разработки [6], были выявлены необходимые требования для создания тренажера ускоренной адаптации для пользователей бионического протеза верхней конечности, а также элементная база всего устройства. В качестве основных характеристик тренажера можно отметить [3]:

1. Диапазон измерения	0,1 – 40 Н
2. Максимальный выходной сигнал датчика	Не менее 0,5 В
3. Спектр частот	
4. Погрешность восстановления	0,3 – 3 Гц
5. Спектр помех	3%
6. Уровень помех	50 Гц
7. Максимальное значение полезного сигнала и помехи	5 мВ 3 Гц, 50 Гц
8. Источник питания	От аккумуляторной батареи
9. Температура окружающей среды	±30 °С

На основе патентного поиска была разработана структурно функциональная схема тренажера (рис. 2) и электрическая принципиальная схема.

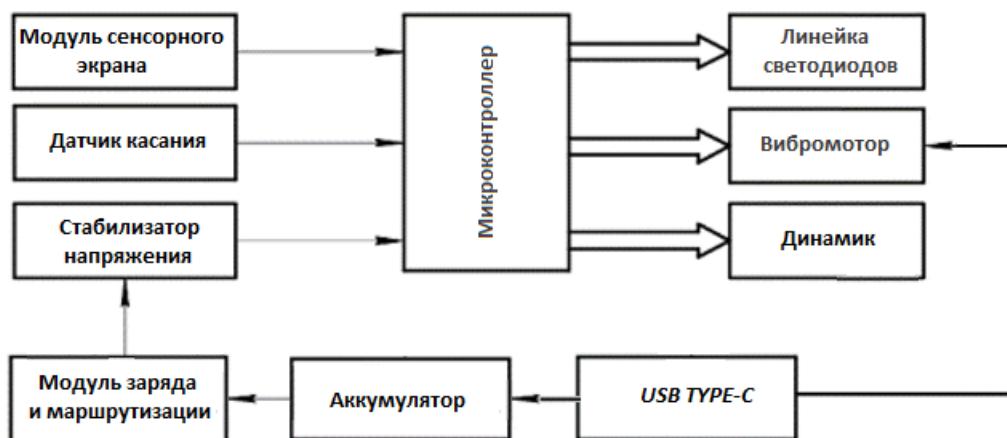


Рис. 2. Структурно функциональная схема биоадаптивного тренажера

В основу биоадаптационного тренажера положен метод биологической обратной связи, реализующий аппаратно-программную методику с применением различных датчиков [6]. Пользователь бионического протеза во время тренировок с тренажером будет способен произвольно контролировать функции оставшихся мышц после ампутации. В разрабатываемом тренажере реализована возможность трех способов взаимодействия с ним: свет, звук, вибрация. Пользователь сам сможет выбрать удобный способ получения информации во время тренировок. Таким образом, биоадаптационный тренажер позволит пользователю протеза не только «видеть и слышать», как функционируют его мышцы культи, но и выполняя специальные упражнения, самостоятельно корректировать работу своего бионического протеза кисти руки [7].

В качестве преимуществ метода биологической обратной связи для пациента можно отметить: простоту метода; неинвазивность; отсутствие побочных эффектов; возможность применения уже с 4-хлетнего возраста; возможность сочетания с любыми другими методами лечения и реабилитации; высокий уровень мотивации пациента (как можно скорее адаптироваться к протезу и вернуться к повседневной жизни); высокая эффективность; процедура проходит в «игровой» форме и состоит из выполнения определенных заданий [6]. В дальнейшем, пользователь сможет свободно использовать свой протез в повседневной жизни, затратив меньше времени на адаптацию с помощью биоадаптационного тренажера [7].

Тренажер со встроенной биологической обратной связью должен обладать модульным дизайном, для легкой установки на протез, обеспечивая надежное прилегание к протезу без соскальзывания. Устройство должно обладать эргономичной формой, чтобы обеспечить естественное ощущение при использовании [8].

Таким образом, отсутствие устройств для ускоренной адаптации к бионическому протезу является серьезной и актуальной проблемой. Это подтверждается отсутствием подобных устройств при анализе патентов на данную тему исследования. Разрабатываемый тренажер ускорит процесс адаптации к протезу и поможет пользователям быстрее вернуться к комфортной повседневной жизни.

## Библиографический список

1. В поисках руки рынка // Официальный сайт «Коммерсантъ». [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5633776>, режим доступа – свободный.
2. Ильичева К.С., Тюрина М.М. (науч.рук.) Исследования способов тренировок до и после этапа протезирования // Физическое воспитание и студенческий спорт глазами студентов: материалы X Международной научно-практической конференции. Казань, 13 декабря 2024 г. / под ред. Ш.Р. Юсупова, Р.А. Юсупова. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2024г. – с. 765-767.
3. Ильичева К.С., Тюрина М.М. (науч.рук.) Разработка тренажера для пользователей бионического протеза верхней конечности // «Наука и молодежь» [Электронное издание]: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Грозный: Издательство ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», 2024. – с. 40-43.
4. Пат. US 20090048539 A1, МПК A61B 5/103. Система и метод сознательной сенсорной обратной связи / LUNDBORG GÖRAN (SE), OSSUR HF (IS); патентообладатель BACON & THOMAS, PLLC 625 SLATERS LANE, FOURTH FLOOR ALEXANDRIA, VA 22314-1176 (US). – № 2006/000367; заявл. 2006.03.23; опубл. 2009.02.19; офиц. Бюл. №11.
5. Пат. RU 2 461 865 C2, МПК G06F 3/01. Система тактильной обратной связи с сохранением эффекта / ЛАКРУА Роберт А. (CA), ГРЕГОРИО Педро (CA), ТИЕРЛИНГ Коллин М. (US); патентообладатель ИМ-МЕРЖН КОРПОРЭЙШН (US). – № 2009135057/08; заявл. 2008.02.04; опубл. 2012.09.20; офиц. Бюл. №26
6. Протез не станет настоящей рукой // [Электронный ресурс]. – <https://sk.ru/news/protez-ne-stanet-nastoyashej-rukoj/> режим доступа – свободный.
7. Биологическая обратная связь // Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева. [Электронный ресурс]. – URL: <https://bekhterev.ru/clinic/fizioterapevticheskoe-otdelenie/biologicheskaja-obratnaja-sviaz/>
8. Ильичева К.С., Тюрина М.М. (науч.рук.) Разработка дизайн-концепции тренажера для пользователей бионического протеза верхней конечности // Инженерная мысль: III Республиканская научно-практическая конференция, 28 ноября 2024г. / Под ред. С.В. Смирновой: сборник докладов. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2024г. – с. 191-194.

## СЕКЦИЯ «СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ»

УДК 658.5; ГРНТИ 82.05.09

### ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРИМЕРЕ АО «ГРПЗ»

С.С. Бутусов, А.В. Губарев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань*

**Аннотация.** В статье рассматривается опыт внедрения концепции бережливого производства на АО "Государственный Рязанский приборный завод". Проанализированы основные этапы трансформации производственной системы предприятия на основе lean-технологий. Представлены результаты применения ключевых инструментов бережливого производства: системы 5S, картирования потока создания ценности, TPM, канбан и SMED. Даны оценка экономической эффективности проведенных мероприятий. Выявлены основные проблемы, возникающие при внедрении бережливого производства на российском промышленном предприятии, и предложены пути их решения. Сформулированы рекомендации по дальнейшему совершенствованию производственной системы предприятия.

**Ключевые слова:** бережливое производство, lean-технологии, производственная система, АО «ГРПЗ», система 5S, картирование потока создания ценности, TPM, канбан, SMED, эффективность производства, промышленное предприятие.

### IMPLEMENTATION OF A LEAN PRODUCTION SYSTEM USING THE EXAMPLE OF GRPZ JSC

S.S. Butusov, A.V. Gubarev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan*

**Abstract.** The article examines the experience of implementing the lean manufacturing concept at JSC "State Ryazan Instrument Plant". The main stages of the enterprise's production system transformation based on lean technologies are analyzed. The results of applying key lean manufacturing tools are presented: 5S system, value stream mapping, TPM, kanban, and SMED. An assessment of the economic efficiency of the implemented measures is provided. The main problems arising during the implementation of lean manufacturing at a Russian industrial enterprise are identified, and solutions are proposed. Recommendations for further improvement of the enterprise's production system are formulated.

**Keywords:** lean manufacturing, lean technologies, production system, JSC «GRPZ», 5S system, value stream mapping, TPM, kanban, SMED, production efficiency, industrial enterprise.

В современных условиях жесткой конкуренции и глобализации рынка перед промышленными предприятиями остро стоит вопрос повышения эффективности производства и снижения издержек. Одним из наиболее результативных подходов к решению данной задачи является внедрение концепции бережливого производства, которая позволяет оптимизировать производственные процессы, минимизировать потери и повысить качество выпускаемой продукции.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью адаптации инструментов бережливого производства к условиям российских промышленных предприятий с учетом их специфики и особенностей производственной культуры. Особый интерес представляет опыт внедрения lean-технологий на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, к которым относится АО "Государственный Рязанский приборный завод" (ГРПЗ).

Целью данного исследования является анализ практического опыта внедрения инструментов бережливого производства на АО «ГРПЗ» и оценка их эффективности. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: рассмотреть теоретические основы концепции бережливого производства, проанализировать текущее состояние

производственной системы предприятия, изучить процесс внедрения lean-инструментов и оценить полученные результаты.

Объектом исследования выступает производственная система АО "Государственный Рязанский приборный завод" – одного из ведущих предприятий радиоэлектронной промышленности России. Предметом исследования являются организационно-экономические отношения, возникающие в процессе внедрения инструментов бережливого производства на промышленном предприятии.

Концепция бережливого производства (lean production) возникла в компании Toyota в середине XX века и получила широкое распространение в мировой практике как эффективный подход к организации производственных процессов. В основе данной концепции лежит стремление к устранению всех видов потерь при одновременном повышении качества продукции и уровня удовлетворенности клиентов.

Бережливое производство представляет собой комплексный подход к организации деятельности предприятия, основанный на постоянном стремлении к устранению всех видов потерь. Согласно концепции, любое действие на предприятии необходимо рассматривать с точки зрения создания ценности для конечного потребителя. Действия, не создающие ценность, считаются потерями и должны быть устраниены.

Основные виды потерь в концепции бережливого производства включают: перепроизводство, лишние запасы, необоснованную транспортировку, излишнюю обработку, простоя, лишние движения и дефекты. В последнее время к этому списку часто добавляют восьмой вид потерь – нереализованный творческий потенциал сотрудников.

Для устранения этих потерь в бережливом производстве используется широкий набор инструментов и методов. Ключевыми среди них являются:

- система 5S – методика организации рабочего пространства
- картирование потока создания ценности (VSM) – инструмент визуализации и оптимизации производственных процессов
- всеобщее производственное обслуживание (TPM) – система обслуживания оборудования
- канбан – система организации производства и снабжения
- быстрая переналадка (SMED) – система сокращения времени переналадки оборудования

Внедрение бережливого производства позволяет предприятиям достичь существенных преимуществ: сокращение производственного цикла, снижение себестоимости продукции, повышение качества, рост производительности труда, оптимизация использования производственных площадей. Важным аспектом является то, что концепция предполагает непрерывное совершенствование всех бизнес-процессов организации и вовлечение в этот процесс всех сотрудников.

При успешном внедрении бережливого производства требует не только технических изменений, но и существенной трансформации корпоративной культуры, формирования нового мышления сотрудников на всех уровнях организации. Это долгосрочный процесс, требующий систематического подхода и постоянной поддержки со стороны руководства предприятия.

Таким образом, бережливое производство представляет собой комплексную управляемую концепцию, направленную на оптимизацию всех производственных процессов с точки зрения создания ценности для конечного потребителя. Эффективность данного подхода подтверждена многолетним опытом ведущих мировых компаний в различных отраслях промышленности.

АО "Государственный Рязанский приборный завод" является одним из ведущих предприятий радиоэлектронной промышленности России. Завод специализируется на разработке и производстве сложных радиоэлектронных систем и комплексов, бортовой аппаратуры,

авиационных систем, гражданской продукции и товаров народного потребления. Предприятие обладает полным производственным циклом: от заготовительного производства до сборки и испытаний готовой продукции.

Анализ производственной системы предприятия выявил ряд существенных проблем, характерных для многих российских промышленных предприятий. В первую очередь это касается организации производственного пространства. На производственных участках наблюдается нерациональное размещение оборудования, что приводит к излишним перемещениям материалов и незавершенного производства. Отмечается значительное количество неиспользуемого оборудования и материалов, занимающих производственные площади.

Исследование производственных процессов позволило выявить следующие основные виды потерь:

1. Избыточные запасы материалов и комплектующих на складах и в производстве.
2. Длительное время переналадки оборудования при смене номенклатуры выпускаемых изделий.
3. Значительное время простоев оборудования из-за поломок и внеплановых ремонтов.
4. Большое количество брака и доработок продукции.
5. Нерациональная организация рабочих мест, приводящая к потерям времени при поиске инструментов и оснастки.

Картирование потока создания ценности на пилотном участке показало, что время создания ценности составляет менее 10% от общего времени производственного цикла. Остальное время приходится на различные виды потерь: ожидание, транспортировку, излишние запасы и другие непроизводительные действия.

Анализ системы планирования производства выявил несовершенство существующих подходов. Часто наблюдается нарушение сроков выполнения заказов из-за отсутствия необходимых материалов или комплектующих, неготовности оборудования или производственной оснастки. Это приводит к авральному режиму работы и, как следствие, к снижению качества продукции.

Отдельно стоит отметить проблемы в области культуры производства и вовлеченности персонала. Наблюдаются низкая инициативность работников в вопросах улучшения производственных процессов, сопротивление изменениям, недостаточное понимание принципов бережливого производства.

Таким образом, анализ текущего состояния производственной системы АО «ГРПЗ» выявил значительный потенциал для улучшений через внедрение инструментов бережливого производства. Основные направления совершенствования должны быть связаны с оптимизацией производственных процессов, сокращением различных видов потерь и развитием производственной культуры предприятия.

На основе проведенного анализа руководством предприятия было принято решение о поэтапном внедрении инструментов бережливого производства. Первым этапом стало внедрение системы 5S на пилотных производственных участках. Данная работа включала сортировку инструментов и материалов, рациональную организацию рабочих мест, внедрение стандартов содержания рабочего пространства. В результате удалось сократить время поиска необходимых инструментов на 70%, высвободить около 20% производственных площадей и значительно улучшить культуру производства.

Следующим шагом стало внедрение системы TPM (Total Productive Maintenance). Были разработаны карты технического обслуживания оборудования, внедрены графики планово-предупредительных ремонтов, организовано обучение операторов базовым навыкам обслуживания оборудования. Это позволило снизить количество внеплановых простоев оборудования на 40% и увеличить показатель общей эффективности оборудования (OEE) с 45% до 65%.

Картирование потока создания ценности было проведено для основных продуктовых линеек предприятия. На основе анализа карт текущего состояния были разработаны карты целевого состояния и планы мероприятий по их достижению. Ключевые улучшения включали:

- оптимизацию расположения оборудования;
- создание производственных ячеек;
- внедрение системы вытягивающего производства;
- организацию супермаркетов комплектующих.

Внедрение системы канбан началось с пилотного участка сборочного производства. Были разработаны канбан-карты, организованы супермаркеты материалов, внедрена система визуального управления запасами. В результате удалось сократить запасы незавершенного производства на 35% и уменьшить время выполнения заказа на 40%.

Особое внимание было уделено внедрению методики быстрой переналадки SMED. Анализ процессов переналадки показал, что значительная часть операций может быть выполнена до остановки оборудования. Была проведена стандартизация процессов переналадки, разработаны технологические карты, проведено обучение персонала. Это позволило сократить среднее время переналадки оборудования с 4 часов до 45 минут.

Для поддержки внедрения инструментов бережливого производства на предприятии была создана специальная рабочая группа, организовано обучение персонала, разработана система мотивации. Важным элементом стало создание информационных стендов и визуализация результатов внедрения улучшений.

Особое внимание уделялось развитию системы подачи предложений по улучшениям. Была разработана простая и понятная форма подачи предложений, организована система их оперативного рассмотрения и внедрения, введено материальное стимулирование авторов реализованных предложений. За первый год работы системы было подано более 500 предложений по улучшениям, из которых более 60% были успешно реализованы.

Таким образом, внедрение инструментов бережливого производства на АО «ГРПЗ» осуществлялось комплексно и системно, с учетом специфики предприятия и вовлечением персонала всех уровней. Это позволило добиться значительных результатов в повышении эффективности производственной системы предприятия.

Оценка эффективности внедрения инструментов бережливого производства на АО «ГРПЗ» проводилась по комплексу ключевых показателей, охватывающих различные аспекты деятельности предприятия. Анализ результатов за период внедрения (2022-2024 гг.) показал существенные улучшения по всем основным направлениям.

В экономическом аспекте были достигнуты следующие результаты:

- снижение производственной себестоимости продукции на 15%;
- сокращение складских запасов на 35%;
- уменьшение затрат на внутривпроизводственную логистику на 25%;
- снижение энергопотребления на 20%;
- сокращение затрат на устранение брака на 40%.

Значительные улучшения произошли в сфере производственных показателей:

- увеличение производительности труда на 30%;
- сокращение времени производственного цикла на 45%;
- повышение коэффициента общей эффективности оборудования (OEE) с 45% до 65%;
- снижение количества брака на 60%;
- уменьшение времени переналадки оборудования на 80%;

Социальные результаты внедрения бережливого производства включают:

- повышение уровня вовлеченности персонала в процессы улучшений;
- рост удовлетворенности условиями труда (по результатам опросов);
- снижение текучести кадров на производственных участках на 30%;

- повышение уровня квалификации работников через систему обучения;
- улучшение социально-психологического климата в коллективе.

Финансовый эффект от внедрения инструментов бережливого производства за рассматриваемый период составил около 150 млн рублей при затратах на внедрение около 25 млн рублей. Таким образом, рентабельность инвестиций в развитие производственной системы составила 600%.

Достигнутые результаты свидетельствуют о высокой эффективности внедрения инструментов бережливого производства на АО «ГРПЗ» и создают основу для дальнейшего развития производственной системы предприятия.

В процессе внедрения инструментов бережливого производства на АО «ГРПЗ» был выявлен ряд существенных проблем, требующих системного решения. Основной сложностью стало сопротивление персонала изменениям, особенно со стороны работников со значительным стажем работы. Многие сотрудники воспринимали новые методы работы как дополнительную нагрузку, не видя в них реальной пользы для производства.

Второй значимой проблемой стала недостаточная системность во внедрении инструментов бережливого производства. Часто улучшения носили локальный характер и не были связаны между собой единой стратегией развития производственной системы. Это приводило к снижению общей эффективности проводимых мероприятий.

Также были выявлены следующие проблемы:

- недостаточный уровень компетенций среднего управленческого звена в области бережливого производства
- сложности в обеспечении стабильности достигнутых улучшений
- формальный подход к внедрению некоторых инструментов
- недостаточная интеграция информационных систем предприятия с инструментами бережливого производства

Для решения выявленных проблем и дальнейшего развития производственной системы предприятия рекомендуется:

1. Усилить обучение персонала всех уровней принципам и методам бережливого производства, уделяя особое внимание практическим аспектам применения инструментов.
2. Развивать систему мотивации персонала, более тесно увязывая ее с результатами внедрения улучшений и достижением целевых показателей.
3. Обеспечить более активное вовлечение руководителей среднего звена в процессы улучшений через систему КПЭ и развитие проектного управления.
4. Внедрить информационную систему управления улучшениями, интегрированную с существующими на предприятии системами.

Перспективными направлениями развития бережливого производства на АО «ГРПЗ» являются:

- распространение успешного опыта пилотных участков на все производственные подразделения;
- интеграция цифровых технологий с инструментами бережливого производства;
- развитие производственной системы поставщиков;
- создание учебного центра по бережливому производству;
- разработка и внедрение корпоративных стандартов бережливого производства.

Реализация данных направлений позволит предприятию выйти на новый уровень эффективности производственной системы и обеспечить устойчивое конкурентное преимущество на рынке.

В долгосрочной перспективе планируется достижение следующих целевых показателей:

- сокращение производственного цикла на 60%;
- снижение себестоимости продукции на 25%;

- повышение производительности труда на 50%;
- достижение уровня ОЕЕ не менее 85%.

Таким образом, несмотря на имеющиеся проблемы, перспективы развития бережливого производства на АО «ГРПЗ» оцениваются как высокие при условии системного подхода к их реализации и поддержки со стороны высшего руководства предприятия.

Проведенное исследование внедрения инструментов бережливого производства на АО "Государственный Рязанский приборный завод" позволяет сделать ряд важных выводов.

Анализ производственной системы предприятия выявил типичные для российской промышленности проблемы: нерациональную организацию производственного пространства, высокий уровень запасов, значительные потери времени на переналадку оборудования, недостаточную вовлеченность персонала в процессы улучшений. Применение инструментов бережливого производства позволило существенно повысить эффективность производственных процессов.

Наиболее значимыми результатами внедрения стали: сокращение производственного цикла на 45%, снижение уровня запасов на 35%, повышение производительности труда на 30%, уменьшение количества брака на 60%. Достигнутый экономический эффект составил около 150 млн рублей при затратах на внедрение около 25 млн рублей, что свидетельствует о высокой экономической эффективности проведенных мероприятий.

Важным результатом стало также изменение корпоративной культуры предприятия в сторону большей открытости к изменениям и вовлеченности персонала в процессы непрерывного совершенствования. Создана работоспособная система подачи и реализации предложений по улучшениям, позволяющая эффективно использовать потенциал сотрудников всех уровней.

При этом выявлен ряд проблем, требующих решения для дальнейшего развития производственной системы: недостаточная системность внедрения улучшений, сопротивление персонала изменениям, сложности в обеспечении устойчивости достигнутых результатов. Разработаны рекомендации по их преодолению, включающие усиление обучения персонала, развитие системы мотивации, внедрение информационных систем управления улучшениями.

Опыт АО «ГРПЗ» показывает, что успешное внедрение бережливого производства на российском промышленном предприятии возможно при условии системного подхода, вовлечения персонала всех уровней и последовательной реализации намеченных мероприятий. Полученные результаты могут быть использованы другими предприятиями при развитии собственных производственных систем.

### **Библиографический список**

1. Баранов, В. В. Внедрение бережливого производства на российских предприятиях: проблемы и перспективы / В. В. Баранов, А. В. Зайцев // Управление производством. – 2023. – № 2. – С. 45-52.
2. Бережливое производство. Основные методы и инструменты : ГОСТ Р 56407-2021. – Введ. 2021-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 24 с.
3. Бережливое производство. Основные положения и словарь : ГОСТ Р 56020-2020. – Введ. 2020-08-01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 20 с.
4. Бережливое производство. Организация рабочего пространства (5S) : ГОСТ Р 56906-2016. – Введ. 2016-10-01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 14 с.
5. Вумек, Дж. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. Вумек, Д. Джонс. – Москва : Альпина Паблишер, 2023. – 472 с.
6. Кузьмин, А. М. Опыт внедрения TPM на промышленных предприятиях России / А. М. Кузьмин, С. В. Петров // Методы менеджмента качества. – 2023. – № 5. – С. 28-35.
7. Оно, Т. Производственная система Тойоты: уходя от массового производства / Т. Оно. – Москва : Институт комплексных стратегических исследований, 2022. – 208 с.
8. Савин, К. Н. Эффективность внедрения системы 5S на производственных предприятиях / К. Н. Савин, А. В. Дмитриев // Стандарты и качество. – 2024. – № 1. – С. 62-68.

9. Синго, С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / С. Синго. – Москва : ИКСИ, 2021. – 296 с.
- 10.Производительность.рф : [сайт]. – Москва, 2024. – URL: <https://производительность.рф> (дата обращения: 05.02.2024).
- 11.Государственный Рязанский приборный завод : официальный сайт. – Рязань, 2024. – URL: <http://www.grpz.ru> (дата обращения: 01.02.2024).
- 12.Lean Enterprise Institute : [site]. – Cambridge, 2024. – URL: <https://www.lean.org> (дата обращения: 10.02.2024).
- 13.Жаров М.В. Моделирование оптимизации для организации производств цехов машиностроения в программной среде anylogic // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. С. 151-161.
- 14.Казаков О.Д. Оценка эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 177-186.
- 15.Кабанов А.А., Федоров И.А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 162-176.

УДК 005.92; ГРНТИ 82.13.13

## **ПРЕИМУЩЕСТВА И ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

**Д.А. Рубцова, А.В. Губарев**

*Rязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань*

**Аннотация.** В работе рассматриваются основные преимущества и причины внедрения системы электронного документооборота технической документации. В статье приведено обоснование внедрения системы электронного документооборота технической документации в современном мире. Кроме того, в статье представлен перечень того, на что стоит обратить внимание при выборе системы электронного документооборота технической документации и какие факторы влияют на реализацию данной системы. Также рассмотрены основные проблемы, с которыми может столкнуться организация при внедрении в свою деятельность системы электронного документооборота технической документации.

**Ключевые слова:** система электронного документооборота, электронный документооборот, документация.

## **ADVANTAGES AND PROBLEMS OF IMPLEMENTING AN ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM FOR TECHNICAL DOCUMENTATION**

**D.A. Rubtsova, A.V. Gubarev**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan*

**The summary.** The paper discusses the main advantages and reasons for the introduction of an electronic document management system for technical documentation. The article provides a justification for the introduction of an electronic document management system for technical documentation in the modern world. In addition, the article provides a list of what you should pay attention to when choosing an electronic document management system for technical documentation and what factors influence the implementation of this system. The main problems that an organization may face when implementing an electronic document management system for technical documentation are also considered.

**Keywords:** electronic document management system, electronic document management, documentation.

В настоящее время каждая организация неизбежно сталкивается с необходимостью внедрения в свою деятельность системы электронного документооборота (СЭД), об этом

свидетельствует то, что все большее число организаций, независимо от их масштаба, переходят на электронный документооборот (ЭДО), считая такой подход более оперативным и удобным для ведения делопроизводства [2].

Традиционные системы управления базами данных не подходят для хранения электронных документов, поскольку они нацелены на работу с отдельной информацией, а не документами. Кроме этого, активное устаревание компьютерной техники и носителей порождают опасность утраты данных и электронных документов из-за риска их повреждения.

Внедрение СЭД процесс длительный и трудоемкий, поэтому стоит тщательно проанализировать насколько необходимо внедрение СЭД именно вашей организации. Важно оценить, смогут ли преимущества от внедрения СЭД окупить финансовые и временные затраты на проект по внедрению. Также стоит учитывать потенциальные сложности и риски, чтобы понять, превысят ли преимущества новой системы ее возможные недостатки.

Ключевые преимущества электронного документооборота [1, 2, 4]:

- многокритериальный поиск документации – быстрое обнаружение файлов через фильтры по дате, типу, ключевым меткам и так далее;
- контроль исполнения заданий по разработке и обработке документации – автоматическое оповещение о приближающихся сроках исполнения поручений;
- регистрация документов;
- ввод резолюций к документам – добавление электронных меток, виз и инструкций непосредственно в цифровой копии;
- распределенная обработка документации в сети – одновременная работа над документами с автоматическим слиянием правок от разных пользователей;
- распределение прав доступа к различным документам и функциям системы – дифференцированный доступ к конфиденциальным данным на основе ролевых профилей сотрудников;
- ведение нескольких картотек документов;
- работа с проектами документов – сохранение истории изменений черновиков с возможностью возврата к предыдущим редакциям;
- распределение входящих поручений в зависимости от стадии исполнения документа по статусам: новые, в работе, на исполнении и другие;
- формирование стандартных отчетов – экспорт структурированных данных в графики, диаграммы и табличные отчеты за выбранный период;
- прямая отправка завершенных документов по электронной почте;
- списание документов в дело;
- контроль перемещений бумажных оригиналов и копий документов, ведение реестров внутренней передачи документов с фиксацией ответственных лиц;
- формирование и управление базами данных пользовательских списков должностных лиц, организаций, тематических рубрик, групп документов;
- настройка и корректировка макетов выходных печатных форм.

Внедрение электронного документооборота способствует сокращению численности состава подразделений, занимающихся обработкой документов, таких как курьерская служба, канцелярия и аналогичных.

С использованием электронного документооборота при изменении внешних факторов, таких как требований по изменению формы отчетности, требуется значительно меньше затрат на перестройку документооборота [3, 9].

Основой успешного функционирования любой организации является эффективная работа ее сотрудников. Но для качественной и результативной работы бумажный метод обработки информации уже не является эффективным. В современном мире необходимо и важно

обеспечить быстрый доступ к информационным ресурсам и сократить время, затрачиваемое на выполнение различных задач.

Внедрение цифровых решений устраняет потребность вручную размножать документы, отслеживать перемещение бумажной документации внутри организации, контролировать порядок передачи конфиденциальных сведений, что существенно снижает трудозатраты делопроизводителей. Сквозной автоматический контроль исполнения на всех этапах работы с документацией повышает качество работы исполнителей, делает сроки подготовки документов более прогнозируемыми и управляемыми.

Совместное использование систем электронного делопроизводства и хранилищ информации способствует систематизации и объединению информации, что значительно упрощает процесс ее анализа и подготовки отчетности. Такие технологии извлечения информации из данных помогают анализировать и выявлять скрытые закономерности в больших объемах данных, что позволяет принимать более эффективные решения и действия. Эти возможности становятся доступны только в рамках системы управления, построенной на базе полного электронного документооборота.

Информационные безбумажные технологии способствуют оптимизации процесса управления знаниями. Они формируют основу решений, обеспечивающих автоматизированный и централизованный обмен знаниями, а также позволяют извлекать только необходимую информацию из множества доступных источников.

Система электронного документооборота может способствовать формированию новой организационной культуры, делая рабочие процессы проще, прозрачнее, интереснее и значимее. Информационные технологии дают возможность заниматься не только выполнением внутриведомственных задач, но и совместно решать более широкий спектр проблем.

При выборе СЭД стоит обратить внимание на [6, 8]:

- функциональную полноту платформы (наличие ключевых функций в системе таких как: процедуры согласования, регистрации, исполнения, контроля исполнения, предоставления доступа и другое);
- зрелость системы (как долго система существует на рынке, какое количество организаций применяет данную систему);
- наличие необходимых карточек документов;
- максимальное количество одновременно подключенных к системе пользователей, при котором система продолжает работать стабильно и скорость обработки запросов является удовлетворительной;
- стоимость лицензий;
- уровень технологической поддержки, как при внедрении, так и во время эксплуатации системы;
- трудоемкость и затраты на модификацию системы;
- сложность и затраты на техническую поддержку и администрирование системы;
- возможность, сложность и расходы на обновление версий;
- стоимость и уровень качества предоставляемых консалтинговых услуг;
- уровень безопасности системы;
- надежность поставщика.

При выборе СЭД необходимо учитывать факторы, влияющие на реализацию данной системы:

- масштаб организации, численность пользователей СЭД;
- организационную структуру, иерархию взаимодействия сотрудников;
- специфику деятельности организации;
- сложность действующего процесса документооборота технической документации в организации;
- продукты программного обеспечения, используемые в организации;

- регламентированность действующего процесса документооборота технической документации в организации;
- требования безопасности к документообороту технической документации в организации.

К главным проблемам, возникающим при внедрении СЭД, можно отнести [2, 3, 6, 7]:

1 Сложность восприятия СЭД сотрудниками и время на привыкание сотрудников к новой системе. СЭД должна быть внедрена на каждом рабочем месте, задействованном в процессах создания, редактирования и хранения информации. В любой организации будут сотрудники, которые привыкли работать с бумажными документами и не готовы перейти на новый вид работы. Как правило, такие ситуации обусловлены либо нежеланием учиться чему-то новому, либо недостаточным уровнем владения компьютером. Такие перемены могут вызвать сложности в работе сотрудников, которые не готовы к ним;

2 Нежелание руководителей работать с ЭДО. Боязнь прозрачности собственной деятельности для руководства, которая возникает после внедрения СЭД;

3 Расходы на приобретение СЭД, ее внедрение и последующее обслуживание. Прежде чем пользоваться СЭД, необходимо ее приобрести, а также стоит учитывать затраты на ее внедрение и обслуживание;

4 Уязвимость в области информационной безопасности. Опытные хакеры способны удаленно взламывать программы СЭД. Поэтому важно отдавать предпочтение надежному производителю, который способен обеспечить высокий уровень защиты своего продукта. В настоящее время невозможно обеспечить абсолютную защиту от доступа к СЭД посторонних лиц, но стоит хотя бы минимизировать возможность возникновения неблагоприятных ситуаций;

5 Придание электронному документу юридической силы. Многие трудности при применении СЭД появляются из-за того, что новые технологии вводятся в условиях законодательства, нацеленного на бумажный документооборот. Данная проблема может быть решена как обычная организационно-техническая задача за счет существования закона, регулирующего использование электронной подписи (ЭП). Благодаря ЭП возможно придать электронным документам юридический статус. Тем не менее, в некоторых организациях считают, что данная технология пока недостаточно совершенна и продолжают юридически значимые документы одновременно создавать и хранить также и в бумажном виде;

6 Взаимодействие с внешним «бумажным» миром. Не во всех организациях, с которыми происходит взаимодействие, внедрена СЭД, поэтому с ними приходится коммуницировать при помощи документов в бумажной форме. Чтобы бумажные документы попали в СЭД, необходимо получить их электронные копии (при помощи сканера), что подразумевает дополнительные затраты времени и сил сотрудников.

На этапе подготовки при внедрении СЭД невозможно полностью избавиться от проблем, возникающих при этом. Каждая организация осуществляет свою деятельность по-разному, поэтому у организации, внедряющей СЭД, не получится подстроиться под каждого заказчика. Это будет происходить в процессе внедрения.

СЭД только лишь начинают применяться с целью организации хранения документов и данных для налаживания результативного доступа к собранным массивам документов. Появляются прочие трудности: предоставление целостности и аутентичности электронных документов на протяжении длительных периодов времени.

Некоторые СЭД в целом не учитывают архивного хранения электронных документов, прочие же настроены таким способом, что удалить из них документы (к примеру, в связи с истечением времени хранения) попросту нереально.

Несмотря на проблемы и сложности внедрения СЭД, они носят условный характер и поддаются решению при грамотном подходе. Более того, количество и вес преимуществ, получаемых организацией, использующей СЭД, превышают возможные сложности и неудоб-

ства. СЭД становятся все более востребованными благодаря тому, что эффект от них заключается не только в прямой экономии ресурсов, но и в повышении качества и эффективности работы организации в целом [5].

### **Библиографический список**

1. Сергеева У.Р., Свеженцева К.И. Особенности использования систем электронного документооборота в контексте цифровизации. // XV Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая», 2023.
2. Никитенко М.А., Дорогов И.А., Савченко М.А., Проблемы цифрового документооборота в крупных компаниях. – Научные записки молодых исследователей №1/2023, с. 77-84.
3. Воробьев В.В. Этапы и проблемы внедрения системы электронного документооборота. // X Всероссийская студенческая научно-практическая конференция «Документ в современном обществе: между прошлым и будущим», 2017, с. 136-139.
4. Обухова В.О. Преимущества, получаемые организацией в результате внедрения системы электронного документооборота. // X Всероссийская студенческая научно-практическая конференция «Документ в современном обществе: между прошлым и будущим», 2017, с. 149-151.
5. Мещерякова К.И., Иванов Д.Р., Иванова И.Г. Сущность системы электронного документооборота // Экономика и бизнес, 2020, с. 38-39.
6. Макаров Р.А. Выборы систем электронного документооборота: этапы, критерии, проблемы. // X Всероссийская студенческая научно-практическая конференция «Документ в современном обществе: между прошлым и будущим», 2017, с. 145-148.
7. Коцюба И.Ю., Котлицкий С.А. Приложение для управления проектами с использованием методологии интеллект-карт // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 72. С. 83-92.
8. Гуляева К.А., Артемьева И.Л. Инструментарий для проектирования систем понятий и баз знаний предметных областей с объектами сложной структуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 62-77.
9. Баранчиков А.И., Федосова Е.Б. Реинжиниринг реляционных баз данных на основе кластеризации атрибутов и технологий интеллектуального анализа данных // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 86. С. 156-161.

УДК 519.246.8 + 681.5.032; ГРНТИ 90.03.03

## **АЛГОРИТМ ВЫБОРА СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАССОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ**

**К.С. Естерекова\*, А.Э. Шафигина\*\*, А.И. Сойко\*\*\***

\*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
Российская Федерация, Казань, karina.yesterekova@mail.ru

\*\* Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
Российская Федерация, Казань, shafigina.98@mail.ru

\*\*\*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Россий-  
ская Федерация, Казань, alexsoiko@yandex.ru

**Аннотация.** В статье представлен алгоритм прогнозирования метрологических характеристик массовых расходомеров на основе временного ряда. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения точности измерений расхода жидкостей и газов во многих отраслях промышленности. Внимание уделяется выбору наиболее адекватной статистической модели, на основе анализа ресурсных испытаний. Применение алгоритма позволяет повысить точность прогнозирования метрологических характеристик, тем самым снизить экономические риски и обеспечить стабильность технологического процесса.

**Ключевые слова:** метрологические характеристики, прогнозирование, статистическая модель.

## ALGORITHM FOR SELECTING A STATISTICAL MODEL FOR PREDICTING METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MASS FLOW METERS

K.S. Yesterekova\*, A.E. Shafina\*\*, A.I. Soyko\*\*\*

\*Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,  
Russia, Kazan, karina.yesterekova@mail.ru

\*\* Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,  
Russia, Kazan, shafina.98@mail.ru

\*\*\*Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,  
Russia, Kazan, alexsoiko@yandex.ru

*The summary.* The article presents an algorithm for predicting the metrological characteristics of mass flow meters based on a time series. The relevance of the work is due to the need to ensure the accuracy of liquid and gas flow measurements in many industries. Attention is paid to the selection of the most adequate statistical model, based on the analysis of life tests. The use of the algorithm makes it possible to increase the accuracy of forecasting metrological characteristics, thereby reducing economic risks and ensuring the stability of the technological process.

*Keywords:* metrological characteristics, forecasting, statistical model.

Метрологическая надежность средств измерений является важной характеристикой для определения точности результатов измерений. Обеспечение высокой метрологической надежности средств измерений (СИ), особенно в условиях длительной эксплуатации, является непростой задачей, требующей постоянного контроля и мониторинга параметров. Несвоевременное обнаружение снижения точности или возникновения отказов приводит к большим экономическим потерям. Для минимизации данных проблем главной задачей является прогнозирование метрологических характеристик (МХ) во время эксплуатации СИ, позволяющие планировать профилактическое обслуживание и своевременно ремонтировать оборудование.

В данной статье рассмотрены существующие подходы к прогнозированию метрологических характеристик, влияющих на показатели надежности, а также предложен алгоритм прогнозирования метрологических характеристик на основе анализа временного ряда.

Алгоритм был апробирован на данных о результатах поверок с сентября 2015 года по сентябрь 2023 года массового расходомера Promass 83.

В результате анализа литературных источников было выявлено, что проблема оценки надежности была и остается актуальной на данный момент, в которых представлены различные подходы оценки и прогнозирования МХ СИ. В данных работах метрологическая надежность оценивается по различным показателям, таким как: вероятность безотказной работы, метрологический ресурс, запас метрологической надежности и т.д.

Показатель достоверности, характеризующий степень доверия к полученным результатам, рассматривается в работе [1]. Метод основан на использовании математической модели эволюции погрешности СИ, где выбрана модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени. В качестве показателя метрологической надежности принимается достоверность. Показатель достоверности определяется как вероятность сохранения погрешности СИ внутри области допусков на эти характеристики за интервал времени. Расчет достоверности осуществляется с помощью метода производящих функций, что упрощает математические операции. Данный метод позволяет прогнозировать погрешность во времени и может быть применен как для дискретных, так и для непрерывных изменений.

В работе [2] определяется исправность приборов и СИ по результатам вычисления запаса метрологической надежности, выражается как квантиль нормального распределения, который характеризует вероятность достижения предела погрешности. Запас рассчитывается на основе модулей предела допустимой погрешности и средней квадратичной погрешности, что позволяет учесть их нахождение в отрицательной зоне. Метрологическая надежность определяется сравнением фактического запаса надежности с допустимым. Данный метод пре-

доставляет возможность определить исправность приборов и СИ, учитывая как случайные, так и систематические погрешности и их влияние на запас надежности, а также позволяет устанавливать разные допустимые границы в зависимости от назначения и требований точности к СИ. При данном методе точность зависит от того, насколько распределение погрешности близко к нормальному закону.

Метрологический ресурс, определяемый как срок службы СИ при заданных условиях эксплуатации, также играет важную роль в прогнозировании надежности. В литературе [3] предложен метод оценки метрологического ресурса на основе исторических данных о работе СИ. Метод основан на построении математической модели изменений МХ во времени с помощью метода интерполяции. Модель используется для интерполяции имеющихся данных и экстраполяции поведения характеристик в будущем, что позволяет дать оценку наступления метрологического отказа или величины метрологического ресурса. Проводится в различных условиях эксплуатации на основе имеющихся априорных знаний о старении элементов, а также на основе знаний о влиянии параметров окружающей среды. Таким образом, данный метод позволяет предсказывать момент наступления метрологического отказа СИ, учитывает влияние старения элементов и параметров окружающей среды, а также позволяет использовать априорные знания для повышения достоверности прогноза.

Таким образом, обзор существующей литературы показывает, что прогнозирование метрологической надежности требует применения комплексных методов анализа. Будущая модель прогнозирования должна учитывать предыдущие данные и на основе их прогнозировать метрологические характеристики. Далее предложен алгоритм прогнозирования метрологических характеристик с учетом специфики массовых расходомеров. На точность измерения и изменения метрологических характеристик расходомеров влияет износ оборудования со временем. Прогнозирование изменений метрологических характеристик в процессе эксплуатации помогает снизить затраты на обслуживание, калибровку и замену расходомеров, обеспечить стабильность технологического процесса.

Прогнозирование метрологических характеристик на основе анализа временных рядов позволяет построить модель адекватно описывающую динамику изменения характеристик и обеспечивает достоверный прогноз.

Временной ряд – последовательность данных, которые отражают развитие какого-либо процесса во времени. Анализ временных рядов позволяет обнаруживать тенденции и закономерности в процессах и прогнозировать будущие изменения. Свойства временных рядов:

1. данные временного ряда структурированы, а атрибуты (признаки) зависят от времени;
2. данные временного ряда имеют определенную последовательность;
3. важно чтобы последовательные значения в данных наблюдались через равные промежутки времени, либо же имели номер измерения по порядку.

Разные статистические модели связаны между собой, для более точных прогнозов одни расширяются и становятся основой для других более сложных моделей.

В данной работе предложен алгоритм последовательного выбора подходящей статистической модели (рисунок 1). Алгоритм сводится к выбору оптимальной прогностической модели.

Данный алгоритм включает в себя следующие этапы:

1. предварительная обработка данных временного ряда;
2. анализ матрицы корреляций признаков, влияющих на значимую метрологическую характеристику. Мультиколлинеарность может негативно повлиять на надежность и интерпретируемость результатов. Поэтому мультиколлинеарные признаки подлежат удалению;

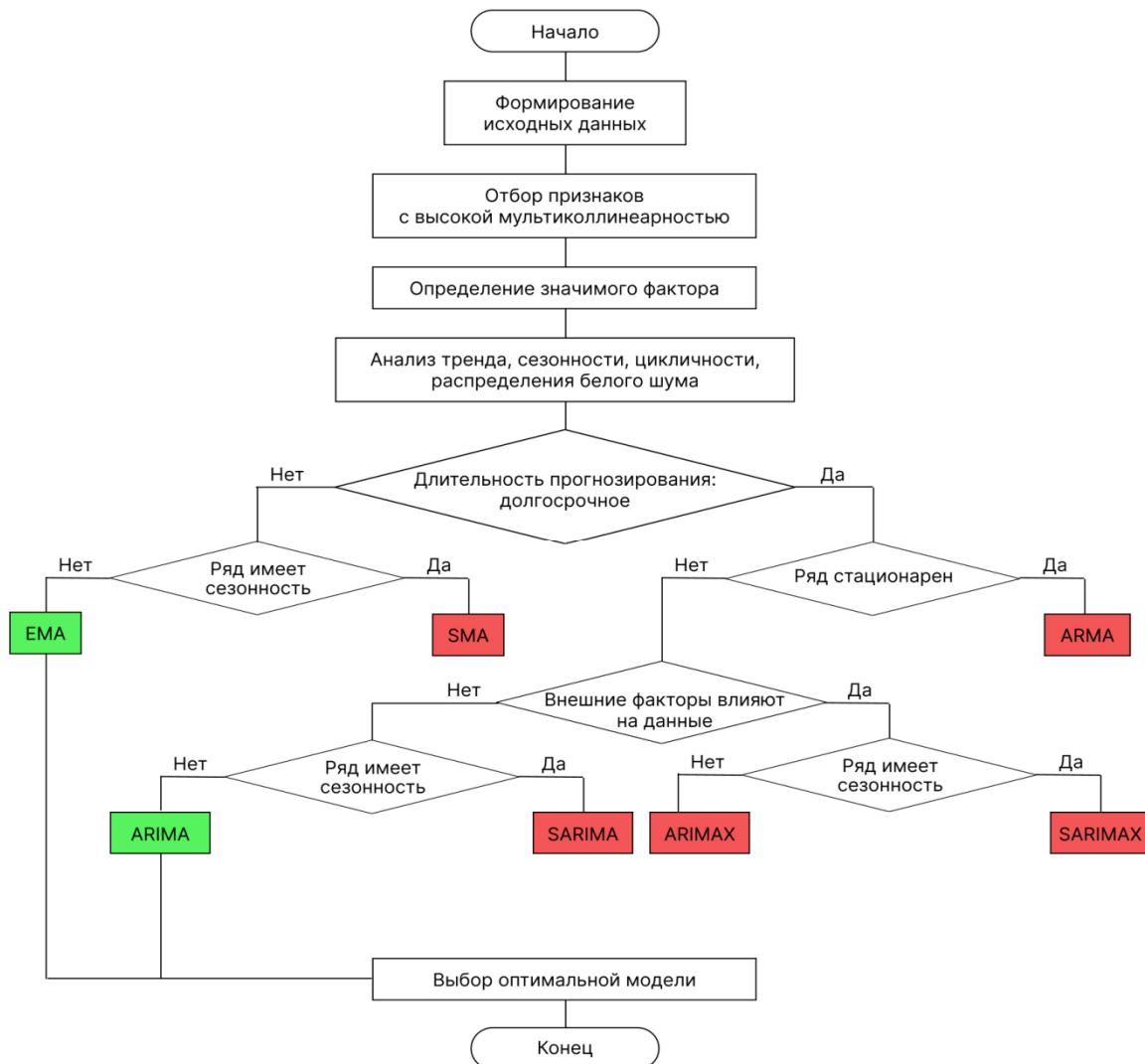


Рис. 1. Алгоритм прогнозирования метрологических характеристик на основе анализа временных рядов

3. построение одномерного временного ряда параметра исследуемого процесса на основании SMF (среднее квадратичное отклонение результатов определений коэффициентов коррекции для точек расхода в рабочем диапазоне);

4. анализ временного ряда для выявления основных компонентов, влияющих на их динамику. Разделение временного ряда на компоненты позволяет лучше понять поведение данных, построить более точные прогнозные модели и интерпретировать результаты. Декомпозиция временного ряда метрологических характеристик на составляющие:

а) выявление тренда, который позволяет выявить тенденцию изменения величины со временем, и указать на постепенное ухудшение точности измерений со временем;

б) анализ сезонности, который позволяет визуализировать периодические колебания ряда вокруг тренда, связанные с определенными периодами времени (например: день, неделя, месяц, год);

в) анализ распределения белого (остаточного) шума это значения, которые являются независимыми друг от друга и одинаково распределены в районе нуля на протяжении всего временного интервала. Анализ остаточного шума важен для оценки адекватности модели и возможности дальнейшего прогнозирования [4].

4. оценка длительности прогнозирования. При краткосрочном прогнозировании и чувствительности к предыдущим данным используется модель EMA, а при наличии сезонности и одинаковой чувствительности ко всем данным SMA.

При долгосрочном прогнозировании также предусмотрена оценка стационарности временного ряда. Ряд стационарен при отсутствии сезонности и тренда, а также когда математическое ожидание и дисперсия постоянны на протяжении всего периода. При нестационарности ряда берется разность рядов, разность выполняется путем дифференцирования ряда, для этого вычисляется разность между двумя соседними наблюдениями ряда. На стационарность ряд можно проверить несколькими способами:

- визуально оценить по графику данных, есть ли какие-либо очевидные тенденции или сезонность;
- использовать статистические тесты (например, тест Дики-Фуллера);
- посмотреть сводную статистику для данных по сезонам и проанализировать есть ли очевидные и существенные различия.

При стационарности ряда используется модель ARMA, это авторегрессионная модель скользящей средней. Авторегрессионная модель представляет собой линейную регрессию прошлых значений самой переменной, что подразумевает зависимость будущего от прошлого. Модель скользящей средней – это регрессионная модель, которая использует прошлые ошибки прогноза для прогнозирования интересующей переменной.

При нестационарности ряда определяется влияние внешних факторов, например, таких как: температура окружающей среды, атмосферное давление, относительная влажность и т.д., далее определяется сезонность и выбирается подходящая модель:

- ARIMA подчиняется модели ARMA, учитывает тренд благодаря скользящему среднему и зависимость от предыдущих значение благодаря авторегрессии;
- SARIMA – это ARIMA с учетом сезонности, помогает различать данные по сезонной частоте, а также по их не сезонным отличиям;
- ARIMAX и SARIMAX в отличие от ARIMA и SARIMA учитывают экзогенные переменные, то есть не только зависимость внутри данных, но и внешние факторы [5].

5. Определение степени точности прогноза на основании статистических метрик таких как, MAE (средняя абсолютная ошибка) и MSE (среднеквадратическая ошибка).

На основании апробации алгоритма, подходящей моделью для данного массового расходомера Promass 83 является модель ARIMA (1,0,1) для переменной SMF. Статистические метрики с результатами 0,0002 (MAE) и 0,0071 (MSE) показывают высокую степень точности прогноза. Это говорит о том, что модель можно использовать для дальнейшего прогнозирования с высокой степенью уверенности.

В ходе данной работы были проанализированы существующие методы прогнозирования показателей метрологической надежности, и разработан алгоритм выбора статистической модели для прогнозирования метрологических характеристик массового расходомера. Алгоритм был апробирован для массового расходомера Promass 83 и может быть адаптирован и применен для других типов расходомеров, способствует улучшению качеству измерений и повышению точности результатов. Таким образом, метод прогнозирования метрологических характеристик на основе временного ряда представляет собой инструмент для повышения метрологического обеспечения СИ в различных отраслях промышленности.

## Библиографический список

1. Яшин В.Н. Оценка метрологической надежности средств измерений с использованием метода производящих функций. ВЕСТН.САМАР.ГОС.ТЕХН.УН-ТА.СЕР.ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ - 2020. 84-96 с.
2. Ефремов Л.В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений. Приборы точной механики - 2010. 51-54 с.
3. Чернышова Т.И, Нистратов М.И. Оценка и повышение метрологической надежности измерительных средств в реальных условиях эксплуатации. Вестник ТГТУ - 2011. 758-764 с.
- 4 Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: Учебник. - М.: Финансы и статистика, 2001. 10-11 с.
5. Comparison of ARIMA and ARIMA Error Regression Models: Evidence from the Russian Consumer Price Index. Proceedings of the 2nd International Conference on Financial Technology and Business Analysis, 2023. 278-288 с.

УДК 658.5; ГРНТИ 82.05.21

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ САМООЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ

А.В. Губарев, С.В. Губарева

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, gubarev.a.v@rsreu.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы организации и проведения самооценки деятельности организации. Приводятся основные предпосылки проведения самооценки деятельности. Представленный фрагмент IDEF0 модели процесса проведения самооценки отражает основные ее этапы. Также приведены подпроцессы проведения самооценки. Для более наглядного представления процедуры проведения самооценки приведена блок-схема алгоритма ее проведения. Детализирована деятельность рабочей группы и ее участников на различных этапах проведения самооценки.

**Ключевые слова:** анкетирование, модель, рабочая группа, самооценка, система менеджмента качества.

## THE METHODOLOGY OF SELF-ASSESSMENT OF THE ORGANIZATION'S ACTIVITIES

A.V. Gubarev, S.V. Gubareva

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, gubarev.a.v@rsreu.ru

**The summary.** The paper discusses the issues of organizing and conducting self-assessment of the organization's activities. The main prerequisites for conducting a self-assessment of activities are given. The presented fragment of the IDEF0 model of the self-assessment process reflects its main stages. The subprocesses of self-assessment are also given. For a more visual representation of the self-assessment procedure, a flowchart of the algorithm for its implementation is provided. The activities of the working group and its participants at various stages of the self-assessment are detailed.

**Keywords:** survey, model, working group, self-assessment, quality management system.

Современное представление о всеобщем управлении качеством нашло отражение в стандарте ГОСТ Р ИСО 9004-2019. Пункт 10.6 данного стандарта разъясняет, что понимается под самооценкой, для чего она применяется, чем способна помочь организации и чему способствуют результаты ее проведения. В соответствии с данным стандартом, самооценка представляет собой всесторонний и систематический анализ деятельности организации и показателей степени ее зрелости.

Многие организации стали применять методику самооценки после выхода первой версии стандартов ISO серии 9000. Область применения методик самооценки стала значительно расширяться в связи с активным процессом внедрения систем менеджмента качества (СМК), которые соответствуют требованиям международного стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015, а также в связи с проведением различных конкурсов на соискание премий по качеству [4, 5].

Самооценка организации предназначена помочь определить те области, которые нуждаются в улучшении, а также расставить приоритеты для совершенствования и сформировать общее представление о функционировании организации и отдельных ее процессов, о степени развития системы менеджмента качества.

Самооценка преследует следующие цели:

- а) выявление слабых и сильных сторон организации;
- б) определение областей, которые требуют немедленного улучшения;
- в) создание прочной основы для обеспечения постоянного совершенствования деятельности организации.

С помощью самооценки выявляются слабые и сильные стороны организации с точки зрения эффективности ее деятельности, проводится сравнительный анализ достигнутого

уровня предприятия с лучшими практиками не только на уровне организации, но и на уровне каких-то отдельных процессов.

Применение самооценки полезно организациям тем, что она представляет собой постоянный мониторинг процессов, помогает контролировать достижение намеченных целей, а также осуществляет повторную оценку, тем самым организация постоянно находится в процессе совершенствования.

Для достижения целей самооценки необходимо решать комплекс таких задач, как:

- а) выбор модели и метода проведения самооценки;
- б) проведение проверок знаний у персонала в области СМК;
- в) проведение обучения персонала основным понятиям системы менеджмента;
- г) организация отдела или группы лиц, которые будут ответственными за проведение самооценки;
- д) проведение анализа результатов самооценки и принятия объективных управленческих решений по итогам самооценки.

В современном мире разработано множество моделей применяемых для самооценки организаций [1]. Наиболее распространенными являются модели международных, национальных и региональных премий по качеству. Модели премий по качеству, а также другие модели самооценки включают в себя широкий перечень детальных критериев по оценке деятельности систем менеджмента.

Представим алгоритм проведения самооценки деятельности в виде диаграммы IDEF0 (рисунок 1).

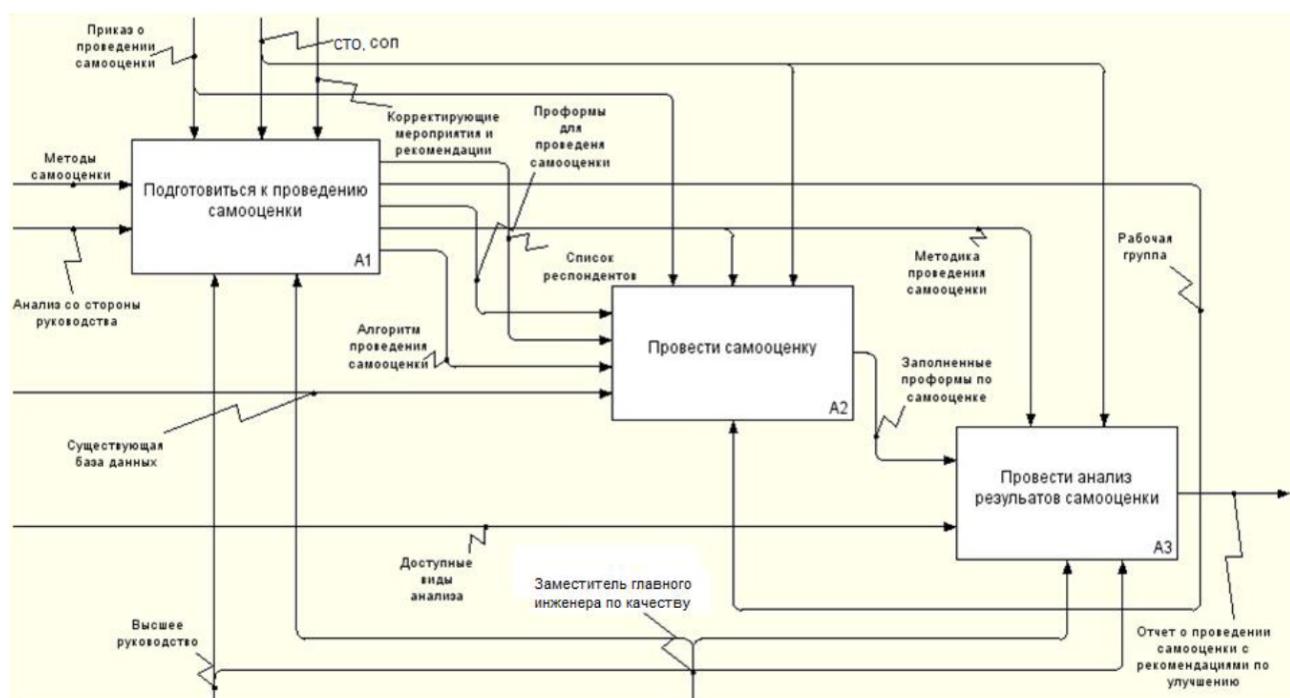


Рис. 1. IDEF0 модель самооценки деятельности (диаграмма А0)

Основным процессом проведения самооценки деятельности организации является решение о ее проведении – процесс А0 «Принять решение о проведении самооценки деятельности предприятия».

Данный процесс состоит из таких этапов как:

- 1) Подготовиться к проведению самооценки;
- 2) Провести самооценку;
- 3) Провести анализ результатов самооценки.

Процесс А1 «Подготовиться к проведению самооценки» включает в себя пять подпроцессов:

а) Подпроцесс А 1.1 «Определить цель самооценки». На данном этапе определяется цель проведения самооценки, что позволит в дальнейшем более адекватно подобрать методику ее проведения;

б) Подпроцесс А 1.2 «Выбрать методику самооценки». Из имеющихся методик выбирается одна, которая удовлетворяет цели самооценки;

в) Подпроцесс А 1.3 «Определить респондентов». Исходя из цели самооценки, формируется список сотрудников, которые будут принимать участие в опросе по критериям самооценки, которые невозможно оценить без анкетирования персонала;

г) Подпроцесс А 1.4 «Подготовить методическое обеспечение». На данном этапе разрабатываются проформы для проведения самооценки деятельности;

д) Подпроцесс А 1.5 «Распределить ответственность и полномочия». На данном этапе выбирается рабочая группа, которая будет проводить самооценку, распределяются ответственности и полномочия. Также на данном этапе проводится оформление надлежащим образом проформ на каждого участника рабочей группы.

Процесс А2 «Провести самооценку» состоит из трех подпроцессов:

а) Подпроцесс А 2.1 «Составить Анкету для респондентов». На данном этапе каждым участником рабочей группы формируются анкетные бланки для респондентов;

б) Подпроцесс А 2.2 «Провести опрос респондентов». Здесь респондентами заполняются полученные анкетные бланки, а также происходит передача заполненных анкет участнику рабочей группы для обработки;

в) Подпроцесс А 2.3 «Заполнить проформы, основываясь на реальных фактах». На данном этапе, каждый участник рабочей группы оценивает каждый критерий, представленный в проформе, анализирует текущее состояние дел по данному критерию и проставляет итоговое количество баллов, но не выше максимального. Оценка формируется только после сбора информации по данному критерию.

Процесс А3 «Анализ результатов самооценки» включает в себя пять подпроцессов:

а) Подпроцесс А 3.1 «Выбрать вид анализа». Из доступных видов анализа выбирается один вид для более содержательного отображения необходимой информации для достижения цели самооценки;

б) Подпроцесс А 3.2 «Выбрать критерии для анализа». Из метода самооценки выбираются те критерии, которые необходимо оценить, чтобы достигнуть цели самооценки;

в) Подпроцесс А3.3 «Провести анализ». Основываясь на виде анализа и критериях анализа, получаем конкретные значения. Анализ результатов самооценки проводится при помощи статистических методов, для более наглядного восприятия;

г) Подпроцесс А3.4 «Сформировать предварительный отчет». Формирование отчета, основанного на результатах анализа. Формирование выводов по результатам самооценки для выработки корректирующих мероприятий и рекомендаций, а также для определения сильных и слабых сторон. Разработка перечня рекомендаций по улучшению системы менеджмента предприятия и всей организации в целом;

д) Подпроцесс А3.5 «Провести заключительное совещание». На данном этапе руководитель проекта проводит совещание с высшим руководством, где предоставляет отчет о проведении самооценки. Совместно с высшим руководством рассматриваются рекомендации по улучшению и разрабатывается план дальнейших действий.

Для более простого понимания алгоритма проведения самооценки деятельности организации представим его в виде блок-схемы (рисунок 2).

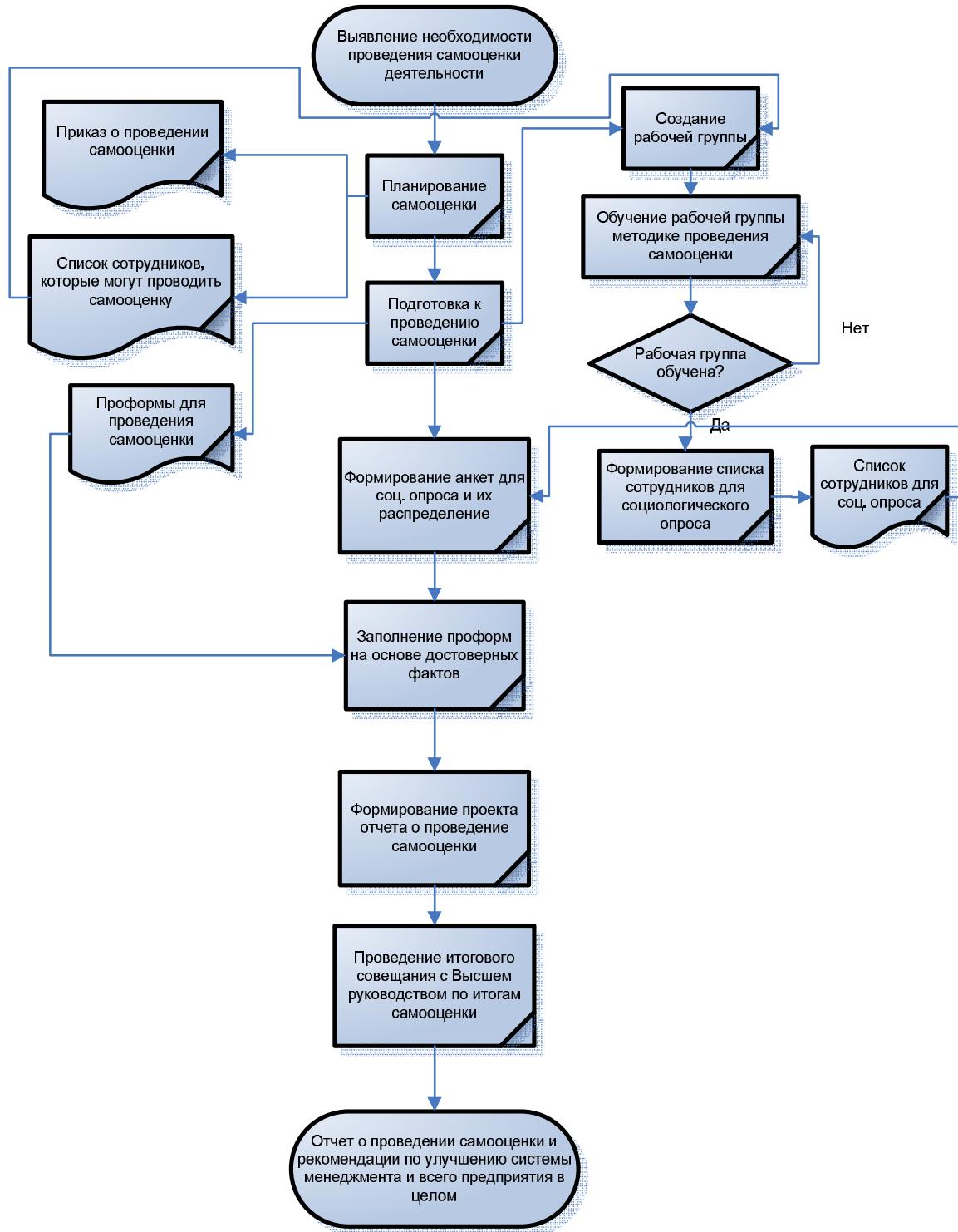


Рис. 2. Блок-схема алгоритма проведения самооценки деятельности

Решение о применении самооценки деятельности организации, как правило, обусловлено необходимостью систематического мониторинга ее деятельности. Проведение самооценки может быть разделено на несколько этапов [2]:

- Начальный этап (планирование самооценки и подготовка к ее проведению);
  - Основной этап (проведение самооценки);
  - Заключительный этап (анализ самооценки и реализация решений).
- Более полная информация по данным этапам представлена в таблице 1.

Таблица 1. Этапы проведения самооценки деятельности

Этап	Содержание этапа
1. Начальный этап (планирование самооценки и подготовка к ее проведению)	1) принятие решения о проведении самооценки, назначение ответственного за ее проведение; 2) доведение данной информации до персонала; 3) создание рабочей группы для проведения самооценки; 4) пересмотр форм для проведения самооценки; 5) обучение членов группы методу самооценки.
2. Основной этап (проведение самооценки)	1) рассылка анкет для социологического опроса по некоторым критериям; 2) обучение по заполнению и заполнение анкет респондентами; 3) сбор анкет; 4) заполнение форм рабочими группами; 5) анализ данных по критериям выбранной модели; 6) проведение заключительного совещания; 7) определение важнейших приоритетов улучшения деятельности.
3. Заключительный этап (анализ самооценки и реализация решений).	1) формирование отчета по самооценке деятельности организации; 2) рассмотрение результатов самооценки на итоговом совещании; 3) формирование плана мероприятий по совершенствованию приоритетных направлений работы; 4) направление на хранение данных по самооценке.

На первом (подготовительном) этапе решение о проведении самооценки должно быть согласовано и принято на уровне руководства организации, доведено до коллектива с разъяснением целей самооценки и ее роли в совершенствовании деятельности организации (проведение вводного совещания).

Руководителем проекта необходимо назначить, например, заместителя директора качества, так как он имеет специальную подготовку в области качества (проходил специальные курсы, участвовал в тематических семинарах) и опыт руководящей работы в данной организации.

В состав рабочей группы войдут сотрудники из списка сотрудников, которые могут быть задействованы в проведении самооценки деятельности (сотрудники каждого структурного, которые имеют необходимые знания о деятельности своего подразделения).

Руководитель проекта проводит обучение всех членов группы методу самооценки.

На втором (основном) этапе проводится сбор данных, составление разделов отчета, оформление предварительного отчета и проведение заключительного совещания между участниками рабочей группы для выявления приоритетных направлений для улучшения деятельности. Размноженные бланки анкет для социологического опроса сотрудников предприятия по некоторым критериям будут разданы для заполнения. Необходимо определиться с числом персонала, который будет участвовать в анкетировании (за каждым участником рабочей группы закрепляется определенное число респондентов). Предварительно каждому респонденту должна быть разъяснена методика заполнения бланков анкет. После сбора всех анкет, рабочая группа обработает результаты анкетирования по каждому из критериев и заполняет формы для проведения самооценки по остальным критериям, основываясь на достоверных фактах. На итоговом совещании членами рабочей группы будут определены приоритеты в совершенствовании деятельности организации с учетом имеющихся ресурсов. При определении приоритетов совершенствования деятельности будут учтены общие принципы и цели предприятия, а также влияние внешних обстоятельств [3].

На третьем (заключительном) этапе будет проведено итоговое совещание, на котором будут рассмотрены результаты проведенной самооценки и направления для улучшения деятельности. Совместно с руководством организации будет разработан план мероприятий по приоритетным направлениям улучшения деятельности предприятия. Данный план следует «встроить» в уже существующую практику планирования деятельности организации.

Таким образом, проведение самооценки в организации способствует совершенствованию деятельности, оптимизации бизнес-процессов, устраниению слабых мест в производственной деятельности.

### **Библиографический список**

1. Тишкина В.В. Алгоритм сбора и анализа экспертных мнений для формирования рекомендательной базы при управлении объектами учёта на основе нечётко-множественного подхода / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 77. С. 93-100.
2. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.
3. Кабанов А.А., Федоров И.А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 162-176.
4. Рубцова А.А., Губарев А.В. Подходы к оценке результативности системы менеджмента качества / Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2023. Сборник трудов XXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2023. С. 55-58.
5. Губарев А.В., Пименова А.В. Система менеджмента риска как инструмент совершенствования деятельности организации / Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2019. Сборник трудов XXXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов. Под общей редакцией В.И. Жулева. 2019. С. 311-313.

УДК: 620.1; ГРНТИ 59.13.21

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ДОПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТАДИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ**

**С.В. Губарева**

Rязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, volkovasvetlan@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются особенности и нюансы проведения испытаний на допроизводственной стадии жизненного цикла изделий. Проанализированы основы исследовательских испытаний, проводимых на стадии исследования нового вида изделий, а также доводочных, предварительных и приемочных испытаний, проводимых на стадии разработки. Каждый из приведенных видов испытаний имеет свои цели, преимущества и особенности осуществления.

**Ключевые слова:** испытания, исследование, жизненный цикл изделий, доводочные испытания, предварительные испытания, приемочные испытания.

### **FEATURES OF TESTING AT THE PRE-PRODUCTION STAGE OF THE PRODUCT LIFE CYCLE**

**S.V. Gubareva**

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, volkovasvetlan@yandex.ru

**The summary.** The paper examines the features and nuances of testing at the pre-production stage of the product life cycle. The basics of research tests conducted at the stage of research of a new type of product, as well as finishing, preliminary and acceptance tests conducted at the stage of development, are analyzed. Each of the above types of tests has its own goals, advantages and special features of implementation.

**Keywords:** testing, research, product lifecycle, finishing tests, preliminary tests, acceptance tests.

В процессе жизненного цикла изделие проходит ряд испытаний, особенности которых обусловлены стадией ЖЦ.

Свою специфику имеют испытания, которые осуществляются на допроизводственной стадии (стадия исследований и стадия разработки продукции).

Стадия исследований сопровождается выполнением исследовательских испытаний.

Они проводятся для анализа реакции объекта на определенное внешнее воздействие при недостатке информации, то есть при недостаточной изученности объекта, например, в ходе исследований, проектирования, выбора оптимальных методов хранения, транспортировки, ремонта и обслуживания.

Задачи исследовательских испытаний включают:

- определение или оценивание параметров качества работы объекта в заданных условиях.

- выбор оптимальных режимов использования или характеристик объекта.
- сопоставление различных вариантов реализации при проектировании и аттестации.
- создание математической модели работы объекта (оценка параметров).
- выявление ключевых факторов, влияющих на качество функционирования.
- выбор подходящего типа математической модели [1, 2].

Исследовательские испытания носят определительный и/или оценочный характер. Определительные тесты направлены на установление значений величин с заданной точностью. Оценочные испытания подтверждают соответствие объекта установленным требованиям.

Во всех отраслях промышленности ключевым фактором при принятии решений по проектам и оценке их эффективности является экспериментальная база.

Эксперимент представляет собой целенаправленное воздействие на изучаемый объект для получения надежных сведений о нём.

Планирование эксперимента – это методология создания математических моделей, предназначенная для:

- увеличения результативности экспериментальных исследований,
- экономии времени и ресурсов, затрачиваемых на эксперимент,
- повышения точности и достоверности полученных данных.

Теория планирования эксперимента базируется на математической статистике, поскольку результаты эксперимента рассматриваются как вероятностные величины или случайные процессы.

Экспериментальные исследования подразделяются на типы, исходя из их организаций:

Натуральные эксперименты – это исследовательский подход, опирающийся на наблюдение и анализ естественных событий и механизмов. Они осуществляются в реальных условиях, в естественной среде, и зачастую не поддаются полному управлению. Задача такого эксперимента – выявление взаимозависимостей и причинно-следственных связей между различными явлениями и процессами.

Модельные эксперименты – это тип исследования, в котором объектом изучения является модель. В отличие от натурального эксперимента, в процесс исследования вводится «промежуточный элемент» – модель. Модельный эксперимент дает возможность исследовать объекты, проведение натурального эксперимента с которыми осложнено, нерентабельно или вовсе исключено из-за определенных обстоятельств.

Как правило, процесс планирования и проведения эксперимента включает в себя ряд последовательных шагов:

1) Формулировка цели (определение задачи, анализ текущей ситуации, оценка ресурсов, определение типа решаемой проблемы);

2) Предварительный сбор данных об объекте исследования (анализ научной литературы, консультации с экспертами и прочее);

3) Выбор метода решения и стратегии его применения (определение типа модели, выявление значимых факторов, выбор целевых функций);

4) Тестирование выбранного метода (пилотные эксперименты для проверки оборудования и методики, предварительная оценка качества модели);

5) Применение выбранного метода (калибровка экспериментальной установки, определение значений целевой функции и факторов, объема выборки, количества повторений и т.д.; этап завершается проведением экспериментов);

6) Анализ и интерпретация результатов, их представление (получение оценок интересующих величин и определение их достоверности, представление результатов анализа в терминах и понятиях соответствующей области науки или техники).

Стадия разработки нового вида продукции подразумевает осуществление доводочных, предварительных и приемочных испытаний.

Доводочные испытания включают в себя тесты, проводимые в процессе разработки продукта для определения того, как изменения влияют на достижение целевых показателей качества.

Их ключевая особенность заключается в исследовательской направленности и проведении на этапе разработки. Само название отражает задачу: «довести» продукт до соответствия заданным требованиям.

Основная цель – оценить, насколько корректировки в технической документации влияют на достижение желаемого качества. Разработчикам необходимо подтвердить качество продукции соответствующей документацией.

Решение о необходимости испытаний принимает проектировщик на стадии разработки, например, при составлении ТЗ или в ходе опытно-конструкторских работ.

Разработчик также отвечает за программу испытаний и выбор методики. К участию можно привлекать производителя.

Испытания проводятся на пилотных или головных образцах изделий, а также на их частях.

Опыт показывает, что области применения доводочных испытаний очень разнообразны: машиностроение, военная техника, медицина, авиаация, ракетостроение, инновационные разработки и другие. Фактически, любое проектирование или улучшение существующих продуктов предполагает их проведение на этапах проектирования и разработки.

Предварительные испытания – это оценочные проверки прототипов или малых партий изделий, проводимые для оценки возможности их представления на приемочные испытания.

Главная цель предварительных испытаний – убедиться в общей функциональности и конкретных эксплуатационных характеристиках продукции. Это является необходимым условием для принятия решения о возможности дальнейшего использования продукции в опытной эксплуатации.

Разрешается тестировать экспериментальные образцы (или целевые серии) выпускаемой продукции, чтобы, получив положительные результаты, представить их на приемочные испытания – следующий этап проверки. Эти испытания проводятся для новых разработок.

Их проводят после завершения отладки и тестирования продукции разработчиком и подготовки документации о готовности к испытаниям. Технические специалисты изучают эксплуатационную документацию, после чего приступают к подготовке и проведению предварительных испытаний, включая определение целей, разработку программы, выбор методов и подготовку оборудования. Данный этап направлен на оценку готовности прототипов к приемочным испытаниям.

Эти испытания – обязательный этап ввода в эксплуатацию любой технической продукции, поэтому они широко распространены.

После завершения проектирования и разработки, а также подготовки конструкторской документации изготавливается опытный образец для предварительных испытаний. Готовится документация с описанием технических характеристик, параметров для изучения, прогнозируемых результатов, на основе чего разрабатывается программа и выбирается методика тестирования.

Преимущества предварительных испытаний:

- подтверждение соответствия основных свойств и параметров объектов исследования технической документации.
- создание условия для перехода к следующему этапу – приемочным испытаниям.
- предоставление возможности оперативно скорректировать техническую документацию для успешной аттестации продукции.
- позволяет оперативно вносить изменения в смежные разработки.
- определение последовательности и содержания следующих этапов тестирования.
- гарантируют безопасную и эффективную эксплуатацию технических устройств, а также соответствие их назначения целям использования.

Предварительные испытания служат своего рода страховкой для организации, минимизируя материальные и финансовые риски, а также предотвращая нерациональное использование трудовых ресурсов [3].

Приемочные испытания представляют собой серию контрольных тестов, которым подвергаются прототипы, опытные партии или уникальные изделия. Их цель – определить, стоит ли запускать данную продукцию в серийное производство и/или применять по назначению.

Главная задача приемочных испытаний заключается в оценке всех параметров, указанных в технических требованиях к продукции. Кроме того, необходимо проверить и подтвердить соответствие опытного образца стандартам, определенным в техническом задании, в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

По итогам приемочных испытаний выносится окончательное заключение о возможности серийного выпуска и применения протестированных изделий.

Приемочные испытания могут быть организованы для прототипов (для принятия решения о вводе изделий в эксплуатацию), опытных серий или единичных экземпляров (для оценки потенциала практического применения продукции).

Иногда можно услышать мнение, что если продукт уже прошел обязательную сертификацию, то приемочные испытания проводить не нужно.

Однако, согласно требованиям ГОСТ, если к продукции предъявляются обязательные требования, которые должны быть подтверждены сертификацией, результаты приемочных испытаний, проведенных аккредитованными лабораториями, могут быть использованы для подтверждения соответствия, но только в рамках обязательных правил.

Более того, регламент обязывает заказчика предоставлять информацию об испытаниях и расчетах вместе с эксплуатационной документацией и техническими условиями для подтверждения соответствия продукции стандартам технических регламентов. В противном случае, без проведения соответствующих испытаний, процесс сертификации может столкнуться с серьезными затруднениями.

Таким образом, испытания на допроизводственной стадии имеют свои особенности, обусловленные необходимостью оценки готовности технологического процесса к серийному выпуску продукции. Они направлены не только на подтверждение соответствия продукции требованиям конструкторской документации, но и на выявление потенциальных проблем в производственной цепочке, связанных с оборудованием, оснасткой, материалами и квалификацией персонала.

## Библиографический список

1. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.
2. Абрамов А.М. Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-143.
3. Казаков О.Д. Оценка эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 177-186.

УДК 62-791.2; ГРНТИ 90.03

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ

Е.С. Шишкиanova

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, shishkanova\_el@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена применению искусственного интеллекта (ИИ) в измерительных процессах, играющих ключевую роль в современной науке и промышленности. В условиях цифровой трансформации и активного развития ИИ открывается множество возможностей для улучшения качества измерений, автоматизации рабочих процессов и повышения общей эффективности оборудования. Рассмотрены основные направления использования ИИ в измерительных технологиях. Приведены успешные примеры применения ИИ в различных отраслях, таких как медицина, промышленность, энергетика и транспорт. Эти примеры демонстрируют, как ИИ помогает в диагностике заболеваний, оптимизации производственных процессов, повышении безопасности и снижении затрат. Однако внедрение ИИ сопровождается рядом проблем, таких как качество исходных данных, интерпретация результатов, обеспечение безопасности и конфиденциальности, а также необходимость точной калибровки оборудования. В статье рассмотрены способы решения этих проблем и обсуждаются перспективы дальнейшего развития ИИ в измерительных процессах.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект (ИИ), измерительные процессы, измерительная техника.

## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEASUREMENT PROCESSES

E.S. Shishkanova

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, shishkanova\_el@mail.ru

**The summary.** The article explores the application of artificial intelligence (AI) in measurement processes, which play a key role in modern science and industry. In the context of digital transformation and the rapid advancement of AI, numerous opportunities emerge for improving measurement quality, automating workflows, and enhancing overall equipment efficiency. The main applications of AI in measurement technologies are examined, along with successful implementations in various industries, including medicine, manufacturing, energy, and transportation. These examples illustrate how AI contributes to disease diagnosis, optimization of production processes, improved safety, and cost reduction. However, integrating AI also presents several challenges, such as ensuring the quality of initial data, interpreting results accurately, maintaining security and confidentiality, and precisely calibrating equipment. The article discusses potential solutions to these issues and explores future prospects for AI development in measurement processes.

**Keywords:** artificial intelligence (AI), measurement processes, measuring instruments.

Измерительная техника занимает центральное место в современной науке и промышленности, обеспечивая точную оценку и контроль различных процессов. С развитием цифровых технологий и искусственного интеллекта (ИИ) открываются уникальные возможности для улучшения качества измерений, автоматизации рабочих процессов и повышения общей эффективности работы оборудования. Данная статья рассматривает основные направления применения ИИ в измерительных процессах, а также анализирует перспективы и проблемы, с которыми сталкивается эта область. Важной особенностью ИИ в контексте измерительных приборов является способность адаптироваться к меняющимся условиям эксплуатации. В отличие от традиционных алгоритмов, которые требуют ручного вмешательства для настройки под новые условия, ИИ может самостоятельно обучаться на новых данных и приспосабливаться к изменениям внешней среды.

### Направления применения ИИ в измерительных процессах

Можно выделить 6 основных направлений применения ИИ в измерительных процессах:

1. Автоматизация и оптимизация измерений. Метрологи ежедневно сталкиваются с необходимостью обрабатывать большие объемы данных, анализировать их и интерпретировать результаты. ИИ может взять на себя многие из этих задач, включая сбор данных, обработку сигналов, коррекцию ошибок и калибровку приборов. Алгоритмы машинного обучения позволяют автоматически находить аномалии в данных, определять тренды и прогнозировать поведение измерительных систем. Это не только ускоряет процесс, но и повышает его качество, снижая риск человеческих ошибок.

2. Повышение точности и надежности измерений. Точность измерений зависит от множества факторов: качества оборудования, условий проведения эксперимента, квалификации персонала и т.д. ИИ может внести значительный вклад в улучшение точности несколькими способами:

- Машинное обучение способно анализировать прошлые данные и обнаруживать систематические ошибки, возникающие в процессе измерений. Затем эти ошибки могут быть учтены и исправлены в будущих замерах.

- Адаптивные модели. ИИ позволяет создавать адаптивные модели, которые могут учитывать изменения внешних условий (например, температуру, влажность, вибрации), влияющие на результаты измерений. Такие модели способны корректировать параметры в реальном времени, что делает измерения более точными.

- Многофакторный анализ. С помощью ИИ возможно одновременно учитывать множество факторов, влияющих на результат измерения. Это позволяет строить более полные и точные модели, отражающие реальную картину происходящего.

3. Анализ больших данных. Современные измерительные приборы генерируют огромные объемы данных, которые сложно проанализировать вручную. ИИ предоставляет мощные инструменты для извлечения полезной информации из этих данных. Модели машинного обучения могут выявлять аномалии и предиктивно предсказывать неисправности оборудования, что помогает предотвратить аварийные ситуации.

4. Улучшение качества данных. Качество данных — ключевой элемент любого научного исследования или производственного процесса. Однако в реальной практике данные часто бывают неполными, зашумленными или искаженными. ИИ предлагает инструменты для улучшения качества данных. ИИ может распознавать и устранять шумовые компоненты в сигналах, что улучшает четкость и точность получаемых данных. Если часть данных отсутствует, ИИ может заполнить пробелы, используя статистические модели и алгоритмы машинного обучения. Кроме того, ИИ возможно можно поручить задачу сверки согласованности данных, поступающих из различных источников, выявляя расхождения и предлагая пути их исправления.

5. Поддержка принятия решений. Современные метрологические системы требуют от операторов быстрого и точного принятия решений. ИИ может служить мощным инструментом поддержки принятия решений. Используя исторические данные, ИИ может предсказывать будущие события и помочь операторам подготовиться к ним заранее, диагностировать неисправности оборудования на ранних стадиях, предупреждая поломки и увеличивая срок службы приборов, а также оценивать риски, связанные с проведением определенных видов измерений, и предлагать альтернативные стратегии для снижения этих рисков.

6. Интеграция с Интернетом вещей (IoT). Интеллектуальные измерительные устройства могут быть интегрированы в экосистему IoT, обеспечивая удаленный доступ к данным и управление оборудованием через облачные платформы. Это открывает возможности для мониторинга и управления в реальном времени, что особенно полезно в сложных инженерных системах.

Мировая практика демонстрирует успешное внедрение искусственного интеллекта в измерительные процессы различных сфер. Примером служит медицинская платформа Watson Health, которая эффективно обрабатывает большие объемы данных из электронных медицинских карт, страховых записей, результатов лабораторных исследований и других источников. Это позволяет выявить новые закономерности и тенденции, что существенно по-

вышает качество медицинского обслуживания. Среди продуктов платформы выделяются Watson for Oncology, обеспечивающий поддержку врачей в принятии решений по лечению рака на основе обширного анализа медицинской литературы и клинических рекомендаций, и Watson for Genomics, предназначенный для анализа генетической информации пациентов с целью обнаружения мутаций и подбора таргетной терапии [2].

В промышленности ИИ широко используется для обеспечения высокого качества выпускаемой продукции и предотвращения поломок оборудования. General Electric использовала ИИ для анализа данных с датчиков, установленных на газовых турбинах. Система предсказывала потенциальные неисправности до их возникновения, что позволило сократить времяостояния оборудования и избежать дорогостоящих ремонтов. За счет раннего обнаружения проблем удалось уменьшить количество незапланированных остановок на 30%, а срок службы турбин увеличился на 20%. Boeing внедрил ИИ для диагностики и прогнозирования состояния авиационных двигателей. Алгоритмы анализировали тысячи параметров в реальном времени, определяли возможные неисправности и предлагали рекомендации по ремонту. Внедрение системы сократило среднее время нахождения самолета на земле после ремонта на 40%, увеличив доступность парка воздушных судов. Coca-Cola применила ИИ для оптимизации производства напитков, используя данные о качестве воды, ингредиентах и процессе розлива. Алгоритмы обеспечивали контроль над процессом смешивания и дозирования, обеспечивая стабильность вкуса и консистенции. Технология позволила увеличить выход готовой продукции на 12% и одновременно сократить отходы на 8%. Siemens использовала ИИ для мониторинга и управления электроэнергией в сети. Система анализировала данные о нагрузке, температуре и других показателях, чтобы предсказывать перегрузки и предотвращать аварии. В результате частота сбоев в электроснабжении сократилась на 35%, а общие потери энергии были снижены на 18%.

Специалисты в области охраны окружающей среды нашли иное применение ИИ. Системы ИИ обрабатывают информацию, поступающую с датчиков, фиксирующих уровень загрязнённости воздуха и воды, установленных в городских районах и на промышленных объектах. Эти данные позволяют идентифицировать источники вредных выбросов и оперативно принимать меры по их устранению [3].

Транспортная отрасль активно внедряет искусственный интеллект в системы автономного управления транспортными средствами. Одним из ярких примеров является использование нейронных сетей в автомобилях Tesla, где данные с камер и радаров обрабатываются в реальном времени, что обеспечивает высокую точность навигации и безопасность движения. Такие технологии открывают путь к созданию полностью автономных транспортных систем будущего.

## **Проблемы внедрения искусственного интеллекта**

**Проблема 1: Качество исходных данных.**

Одной из ключевых проблем является качество исходных данных, используемых для обучения моделей ИИ. Если данные содержат ошибки, пропуски или систематические искажения, это неизбежно приведет к неправильной работе алгоритмов. В результате модели будут выдавать недостоверные результаты измерений. Особенно остро эта проблема стоит в тех случаях, когда доступ к качественным данным ограничен или невозможен.

Для решения данной проблемы необходимы тщательная предварительная обработка данных, использование методов очистки и нормализации, а также регулярная проверка корректности собранной информации. Применение технологий машинного обучения для автоматического выявления аномалий и ошибок в данных также может значительно повысить точность измерений.

**Проблема 2: Интерпретация результатов.**

Вторая значимая сложность связана с интерпретацией результатов работы ИИ-моделей. Алгоритмы ИИ часто действуют как «черный ящик»: они выдают результат, но сложно понять, каким образом этот результат был получен. Это особенно критично в изме-

рительных процессах, где важна прозрачность и возможность проверки полученных значений.

Решениями этой проблемы могут стать разработка интерпретируемых моделей ИИ, внедрение методов объяснения решений (например, LIME или SHAP), а также создание инструментов визуализации процессов принятия решений моделью. Такие подходы позволят пользователям лучше понимать работу системы и повысит доверие к результатам измерений.

#### Проблема 3: Обеспечение безопасности и конфиденциальности.

Использование ИИ в измерительных процессах требует повышенного внимания к вопросам безопасности и защиты персональных данных. Особенно это актуально в медицинских исследованиях, финансовых операциях и промышленных системах контроля качества. Утечка конфиденциальной информации или несанкционированный доступ к данным могут привести к серьезным последствиям.

Для минимизации рисков необходимо внедрять строгие меры кибербезопасности, такие как шифрование данных, многофакторную аутентификацию и регулярные аудиты систем. Важно также учитывать законодательные требования к защите данных, такие как GDPR в Европе или ФЗ-152 в России.

#### Проблема 4: Эталонные измерения и калибровка.

Еще одной сложностью является необходимость обеспечения точности эталонных измерений и правильной калибровки сенсоров и датчиков. ИИ-системы полагаются на входные данные от физических устройств, и любые отклонения в их работе могут существенно повлиять на конечный результат. Неправильная калибровка может привести к систематическим ошибкам, которые сложно выявить без дополнительного анализа.

Регулярное проведение проверок и калибровок оборудования, а также использование современных методов коррекции ошибок помогут минимизировать влияние этого фактора. Также важно учитывать динамику изменения характеристик сенсоров со временем и предусматривать механизмы автоматической адаптации моделей ИИ к таким изменениям.

Перспективы применения ИИ в измерительных процессах продолжают расширяться. Помимо уже упомянутых примеров в медицине, промышленности и транспорте, ИИ начнет активно внедряться в сельском хозяйстве, энергетике и космических исследованиях. В сельском хозяйстве ИИ сможет помочь в анализе почв, предсказании урожайности и оптимизации использования удобрений. В энергетике ИИ будет использоваться для управления энергосистемами, прогноза спроса и распределения ресурсов. В космической отрасли ИИ поможет в анализе данных с телескопов и спутников, а также в планировании миссий и поддержке автономных аппаратов.

### Библиографический список

1. R. Taymanov, K. Sapozhnikova, and A. Shutova Artificial intelligence and Measurements, Conference: 2nd IFSA Winter Conference on Automation, Robotics & Communications for Industry 4.0 (ARCI' 2022) At: Andorra la Vella, Andorra.
2. S.P. Somashekhar, M.-J. Sepúlveda, A.D. Norden, A. Rauthan, K. Arun, P. Patil, et al. Early experience with IBM Watson for Oncology (WFO) cognitive computing system for lung and colorectal cancer treatment J Clin Oncol, 35 (2017), p. 8527.
3. Sreeni Chadalavada, Oliver Faust, Massimo Salvi, Silvia Seoni, Nawin Raj, U. Raghavendra, Anjan Gudigar, Prabal Datta Barua, Filippo Molinari, Rajendra Acharya Application of artificial intelligence in air pollution monitoring and forecasting: A systematic review, Environmental Modelling and Software 185 (2025) 106312.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАЦИЯ О VIII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2025».....</b>	3
<b>МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ».....</b>	6
<b>Секция «ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ».....</b>	6
Зеленин И.А., Таганов А.И. Оптимизация траектории движения в станках ЧПУ .....	6
Ушенкин В.А., Федотов К.Г. Формирование модельных данных для отработки алгоритмов обработки космических радиолокационных изображений.....	13
Ушенкин В.А., Соколов Е.А. Сегментация объектов на мультиполяризационных радиолокационных изображениях.....	18
Ушенкин В.А., Ларюков С.А. , Овчинников В.А. Эффективное выполнение нейросетевых расчётов на видеоускорителе в задаче сегментации облачности на оптических спутниковых изображениях.....	23
Ушенкин В.А. Уточнение угловой ориентации космического аппарата радиолокационного наблюдения Земли на основе анализа целевой информации.....	27
Ушенкин В.А. Уточнение геодезической привязки радиолокационного изображения по опорному оптическому снимку.....	33
Ушенкин В.А. Комплексирование разнородной информации от космических аппаратов радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	38
Ушенкин В.А. Модификация технологической схемы интерферометрической обработки информации от систем радиолокационного наблюдения Земли с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации.....	44
Чесных И.А. Устранение шума на изображении путём вейвлет-фильтрации.....	48
Соколов К.И., Макарова Н.В. Построение дерева вейвлет-пакетного разложения при коррекции радиометрического шума на изображениях.....	52
Попов А.О. Шумоподавление изображения с использованием вейвлет-преобразования Добеши.....	55
Гусев С.И., Кузнецов Л.Л., Ушенкин В.А. Обнаружение водной поверхности на полнополяризационных радиолокационных изображениях.....	58
Линьков В.А., Линькова С.Ю. Многоматричные мультивекторные маневровые двигательные системы для малоразмерных космических аппаратов.....	61
Антонушкина С.Д., Князьков П.А. Алгоритм автоматического определения дефектов оптических изображений дистанционного зондирования Земли от датчиков сканового принципа действия.....	70
Осипова Т.А., Райков Н.А. Сравнительный анализ способов текстурирования трёхмерного земного эллипсоида данными ДЗЗ с помощью технологии OPENGL.....	78

Воронин А.А., Соловьев А.В., Андреев Д.А. Построение картины дрейфа ледовых образований с применением триангуляции Делоне на основе спутниковых снимков.....	84
Воронин А.А., Кузнецов Д.А. Алгоритм векторизации границ площадных объектов на растровых картах.....	88
Кокунов А.А., Таганов А.И. Применение градиентной оптимизации к многомерным алгоритмическим процессам.....	92
Шапошников Н.А. Реализация алгоритма сегментации облачных объектов на спектрозональных спутниковых снимках с использованием диспарантности.....	97
Пасичняк В.Е., Колесенков А.Н. Интеграция физиологических и визуальных данных для улучшения точности определения эмоциональных состояний.....	103
Чубаров Д.С., Бодров О.А., Москвитин А.Э. Алгоритм геометрической коррекции спутниковых изображений для повышения точности их совмещения.....	107
Соловьев А.В., Архипкин В.М. Алгоритм обнаружения облачного покрова на мозаичных спутниковых снимках с выравниванием яркости.....	110
Бодров О.А., Поборуева М.С. Разработка плагина для оценки эффективности модели ИоТ при его внедрении на предприятии.....	115
Попов А.О. Исследование методов задачи коммивояжера в приложении к маршрутной оптимизации траекторных задач.....	118
Горобченко А.С., Егин М.М. Исследование алгоритмов обнаружения изменений для обработки данных стерео и площадной съёмки.....	123
Васильев Е.П., Нгуен Д.Х. Применение методов и алгоритмов оптимизации для моделирования МЭМС-переключателей.....	130
Родина А.С., Рыжиков В.В. Алгоритмическое обеспечение комплекса обработки данных дистанционного зондирования Земли в части визуализации опорных данных.....	137
Васильев Е.П., Лыу Тхань Дац Статистическое моделирование микроволновых фильтров на связанных линиях.....	141
Мыльников И.Н. Точность оценки скорости быстродвижущихся космических объектов при их радиолокационном зондировании с Земли: негативное влияние частотных свойств земной атмосферы.....	145
Васильев Е.П., Климчук Н.В. Использование системы поддержки принятия решений для автоматизированного проектирования микроволновых РЭС.....	150
<b>Секция «АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБОРО- И МАШИНОСТРОЕНИИ».....</b>	<b>155</b>
Волков И.Н., Бурковский В.Л. Алгоритмизация принятия решений в системе нечеткого управления процессом разогрева битума.....	155
Карпухин Д.Н., Бурковский В.Л. Гибридный подход для построения интеллектуальной системы мониторинга производственных процессов.....	158
Дмитриев О.С., Барсуков А.А., Дмитриев С.О. Определение оптимального размера образцов для исследования процесса отверждения полимерных композиционных материалов.....	162

Миловзоров О.В., Мосина А.М. От ручных измерений к цифровым моделям: реализация обратного инжиниринга с использованием КОМПАС-3DM.....	168
Сафаров К.Г., Фролова Д.А., Бадын А.В. Устройство горячего экструдирования полимеров для аддитивного производства с термостабилизацией.....	175
Романов И.Н. Пакет Elmer как метод изучения стека инструментов современных САЕ-систем.....	179
Преображенский Е.В., Галкин В.И., Маркелов Е.Е. Разработка программного модуля для определения припусков и допусков на размеры стальных поковок.....	185
Зеленков К.А., Тинина Е.В. Элементная база системы контроля и управления допуском на предприятии.....	189
Порнякова Д.А., Трушнина К.Ю. Методы анализа больших объёмов производственных данных.....	192
Выставкин К.О., Романов И.Н. Методы формирования полётных заданий для БПЛА: от планирования до практической реализации.....	195
Кузьмина Е.М., Лашин В.А. Возможности и ограничения использования пассивных корректоров положения дуги в электродуговых печах постоянного тока.....	198
Бусаров Н.А., Грибов Н.В., Миловзоров О.В. Модуль диспетчеризации производства для PDM системы.....	202
Хуснутдинова А.Д., Рыбкина А.А. Разработка CRM-системы на базе QUINTADB для малого и среднего бизнеса.....	206
Живоложнев И.А. Автоматизация процесса сбора и обработки информации о характеристиках транспортной системы густозаселенной территории.....	211
Морозкин А.М., Ленков М.В. Алгоритмы параметрической оптимизации в CAD-системах: повышение гибкости и эффективности конструкторских решений.....	215
Некрасов Н.Ж. Внешний и внутризаводской учёт запасных частей промышленного оборудования.....	218
Попов Г.А., Ленков М.В. Интеграция IoT И BIG DATA для мониторинга и анализа работы станков с ЧПУ.....	223
Сморчков С.Г., Ленков М.В. Автоматизированная система информирования о технологических параметрах котельной.....	226
Хлебников Н.М., Ленков М.В. Система автоматического регулирования технологических параметров нефтеперекачивающей станции.....	230
Трифонов С.А., Ленков М.В. Автоматизированная система поддержания оптимального микрококлимата для роста овощных культур.....	237
Хлебников Н.М., Ленков М.В. Автоматизированная система управления установкой перекачки нефтепродуктов.....	233
Авилов В.Н. Обработка инструментальных сталей после закалки.....	240

<b>Секция «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ».....</b>	244
Каплан М.Б. Представление многоэлементной полеформирующей системы магнитотерапевтического аппарата.....	244
Тогулов А.С., Каплан М.Б. Информационно-измерительная система контроля параметров компонентов магнитотерапевтических аппаратов.....	248
Абрамов А.М. Определение статических и динамических характеристик АЦП по стандарту IEEE 1241.....	253
Холопов С.И. Синтез периодических измерительных сигналов произвольной формы.....	256
Гуржин С.Г., Шуляков А.В. Особенности применения и погрешности оптических датчиков, используемых в комплексной хрономагнитотерапии.....	262
Абдиматова Т.Д. Ультразвуковой мониторинг биологических и техногенных процессов.....	269
Рысбекова А.А. Локализация источников опасного ультразвукового излучения.....	274
Мельник О.В. , Саблина В.А. , Яковлев Н.В. Исследование влияния музыки на эмоции человека на основе анализа микровыражений лица.....	278
Матяшина С.А., Гуржин С.Г. Способ бесконтактной регистрации процессов сердцебиения и дыхания человека посредством веб-камер и виртуальных приборов в среде MATLAB.....	283
Ильичева К.С., Тюрина М.М. Особенности разработки биоадаптационного тренажера бионического протеза кисти руки.....	288
<b>Секция «СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ».....</b>	292
Бутусов С.С., Губарев А.В. Внедрение системы бережливого производства на примере АО «ГРПЗ» .....	292
Рубцова Д.А., Губарев А.В. Преимущества и проблемы внедрения системы электронного документооборота технической документации.....	298
Естерекова К.С., Шафигина А.Э., Сойко А.И. Алгоритм выбора статистической модели прогнозирования метрологических характеристик массовых расходомеров.....	302
Губарев А.В., Губарева С.В. Методика проведения самооценки деятельности организации.....	307
Губарева С.В. Особенности проведения испытаний на допроизводственной стадии жизненного цикла продукции.....	312
Шишканова Е.С. Применение искусственного интеллекта в измерительных процессах....	316

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ****Научное издание****В 10 томах****Том 6**

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.25. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л..

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Редакционно-издательский центр РГРТУ,  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

ISBN 978-5-7722-0428-3

