

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В КОНСТРУИРОВАНИИ ЭС**

Межвузовский сборник научных трудов

Рязань 2025

УДК 004 + 621.3

Информационные технологии в конструировании ЭС, межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2025. – 354 с.

**ISBN 978-5-908007-17-7**

Публикуются статьи о проблемах использования информационных технологий в конструировании электронных средств.

Сборник рассчитан на научных сотрудников, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Авторская позиция, орфография, пунктуация и стилистические особенности публикаций сохранены.

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. В.П. Корячко (ответственный редактор), д-р техн. наук, проф. В.А. Минаев (МУ МВД России им. В.Я. Кикотя), д-р техн. наук, проф. Ю.Л. Леохин (Московский технический университет связи и информатики), д-р техн. наук, проф. О.Я. Кравец (Воронежский государственный технический университет), д-р техн. наук, проф. Д.О. Жуков (МИРЭА – Российский технологический университет), д-р техн. наук, проф. С.В. Скворцов (РГРТУ), д-р техн. наук, проф. Д.А. Перепелкин (РГРТУ), канд. техн. наук, доц. А.Н. Сапрыкин (ответственный секретарь).

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. А.Н. Пылькин (Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина), д-р техн. наук, проф. А.П. Карпенко (Московский государственный технический университета имени Н.Э. Баумана).

**ISBN 978-5-908007-17-7**

©Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 2025

©Коллектив авторов, 2025

© ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

**Аксентьев М.Е.**

Значимость внедрения каталогизации на предприятиях ..... 9

**Андреанов И.А., Донцов Д.В.**

Выбор несущей системы передачи информации при построении системы умный дом ..... 14

**Андреанов И.А., Донцов Д.В.**

Методы интеграции пользовательских устройств в экосистему ЯСмарт (Яндекс Умный дом) ..... 18

**Антонушкина С.Д., Князьков П.А.**

Разработка программной технологии автоматического обнаружения дефектов оптических изображений ДЗЗ от датчиков сканового принципа действия ..... 21

**Аристархов А.В.**

Программное моделирование микрополоскового ФНЧ в Ansys HFSS: углубленный анализ алгоритмов моделирования и практические аспекты применения ..... 31

**Арутюнова А.В., Сапрыкин А.Н.**

Использование САПР SolidWorks для трехмерного проектирования сложных деталей ..... 35

**Беликов М.А., Ильиных В.А.**

Особенности компоновки электроники в условиях повышенной температуры ..... 40

**Борисов И.С.**

Многопроцессорные системы в наше время ..... 50

**Бочарова К.Е.**

Анализ влияния скорости режущего движения при лазерной резке с ЧПУ на шероховатость и точность ..... 54

**Букина Ю.А.**

Обзор методов повышения точности цифровых частотомеров на базе микроконтроллеров и ПЛИС ..... 61

**Бурцева С.Н., Сапрыкин А.Н.**

Разработка программного модуля графической визуализации телеметрической информации ..... 68

**Гвоздков А.А.**

Широкополосные генераторы для наружного применения: комплексный анализ проблем и перспективные технические решения ..... 76

**Гостина А.А.**

Принципы функционирования бортовой радиолокационной системы ..... 83

**Гуров А.С.**

Технологии интеграции информационных систем на предприятиях . 96

**Дорошин Е.Д.**

Разработка и реализация информационно-управляющей системы для геологоразведочных работ ..... 100

**Дорошин Е.Д.**

Перспективы развития информационных технологий в нефтегазовой отрасли ..... 105

**Золотов Г.А.**

Алгоритм расслоения многослойной печатной платы ..... 109

**Золотов Г.А.**

Трассировка методом встречной волны ..... 113

**Кастерина Е.А., Серебрякова С.С.**

Надежность и тестирование электронных средств в экстремальных условиях ..... 117

**Королев А.О.**

Применение современных 3D-принтеров в учебном процессе ..... 125

**Костяева А.М.**

Применение эвристических и эволюционных алгоритмов размещения ..... 130

**Кулакова И.В.**

Исследование высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения ..... 138

**Лапутин А.А.**

Анализ проблем обработки показателей датчиков ..... 142

**Лахмыткин Н.Д.**

Поиск и устранение импульсных помех на спутниковых изображениях ..... 147

**Лёшин М.Д.**

Аппаратные кодеки в потоковом видео ..... 151

**Лёшин М.Д.**

Аппаратная защита потокового контента ..... 158

**Малин И.С.**

Обзор современных решений по беспилотным авиационным системам с интегрированным машинным зрением ..... 165

**Миронов М.С.**

Применение 3D-печати в проектировании электронных средств ..... 172

**Мотин И.Д.**

Разработка системы мониторинга температуры и влажности с использованием GSM и интернет-уведомлений ..... 176

**Муранов В.П.**

Применение нейросетей для анализа данных из САД-программ ..... 183

**Орлов В.Д.**

Обоснование необходимости разработки и моделирования гибридной системы охлаждения для повышения эффективности солнечных модулей ..... 186

**Петров Р.С.**

Разработка портативного графического модуля с использованием микроконтроллера Arduino ..... 196

**Прокофьев А.В.**

Сравнительный анализ современных алгоритмов трассировки многослойных печатных плат..... 203

**Прокофьев А.В.**

Современные подходы к проектированию электронных средств..... 214

**Разоренов М.С., Лобачев М.А.**

Интеграция прикладных информационных систем на производственном предприятии: проблемы, методы и перспективы ..... 220

**Репин В.Д.**

Анализ методик системного проектирования миниатюрных микроволновых фильтров ..... 224

**Рыбин В.П.**

Конструирование охранного GSM устройства с оповещением по сети сотовой связи/интернету ..... 229

**Светиков Д.М.**

Мобильное приложение для мониторинга состояния автомобиля в реальном времени с использованием данных OBD-II ..... 236

**Селифанова Е.А.**

Сравнительный анализ методов измерения емкости конденсаторов ..... 244

**Селифанова Е.А.**

Современные устройства для измерения ёмкости конденсаторов.... 252

**Серебрякова С.С., Кастерина Е.А.**

Применение технологий 3D-печати в прототипировании электронных устройств ..... 259

**Слепцова А.Ю.**

Разработка устройства с поддержкой нескольких потоковых технологий для воспроизведения аудио (Bluetooth + Wi-Fi) ..... 268

**Соколов Н.А., Скворцов С.В.**

Программное обеспечение мониторинга данных с видеокамеры на основе технологий искусственного интеллекта ..... 272

**Терехов А.В.**

Разработка и оптимизация волновых алгоритмов трассировки в сложных электроустановках ..... 279

**Терехов А.В.**

Использование систем компьютерного зрения для автоматизации инспекции и тестирования печатных плат ..... 284

**Трохимчук В.В.**

Использование нейронных сетей в размещении блоков электронно-вычислительных средств..... 287

**Фетисов А.А.**

Применение искусственного интеллекта в CAD системах для увеличения эффективности проектирования..... 297

**Халиков А.Х.**

Система автоматизированной проверки узлов и блоков бортовой радиолокационной станции ..... 300

**Хрюкин В.И.**

Метод определения частотных характеристик системы по ее передаточной функции..... 304

**Цветков А.Ю.**

Разработка инерциальной навигационной системы, применение и экспериментальные результаты..... 309

**Чаплыгин В.Д.**

Разработка конструкции стенда ударных испытаний ..... 317

**Челянов Р.Д.**

Роль генератора импульсов в аппаратуре для разведки горных пород ..... 320

**Ченгаев М.В.**

Визуализация списков цепей и элементов через QGraphicsScene..... 327

**Ченгаев М.В.**

Оптимизация последовательного алгоритма компоновки электронных схем на основе списков цепей..... 332

**Чирков В.Р.**

Цифровая эра звуковой дефектоскопии: развитие и инновационные технологии в неразрушающем контроле ..... 336

**Чубаров Д.С.**

Оптимизация совмещения снимков земли в различных спектральных диапазонах..... 340

**Чугунов Е.В.**

Компас с GPS-приемником на базе микроконтроллера Arduino..... 343

**Юрков Д.М.**

Облачные CAD-системы: преимущества, сравнение и перспективы ..... 349



УДК 004.65

**АКСЕНТЬЕВ М.Е.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ЗНАЧИМОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ КАТАЛОГИЗАЦИИ  
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ**

*Рассматривается значимость каталогизации в современных методах управления данными и ее влияние на эффективность работы предприятий. Каталогизация является важным инструментом, который способствует эффективному поиску данных и оптимизирует управление метаданными, благодаря которому, предприятия могут максимально использовать свои данные, улучшая процессы принятия решений и управление бизнесом.*

В условиях стремительного развития информационных технологий предприятия сталкиваются с задачей эффективного использования больших объемов данных. Увеличение их объема, разнообразие источников и сложная структура делают управление данными особенно актуальным. Каталогизация становится ключевым элементом стратегий управления, представляя собой централизованное цифровое хранилище метаданных, описывающее активы данных (базы, таблицы, документы). Она упрощает поиск и управление информацией, устраняя трудности, связанные с точностью и актуальностью данных, что повышает производительность и снижает риски неэффективности. Каталоги данных позволяют быстро находить и анализировать ресурсы, предоставляя пользователям доступ к нужной информации в интуитивно понятной форме. Это ускоряет принятие решений и обеспечивает конкурентные преимущества, тогда как отсутствие легкого доступа к данным может привести к упущению возможностей для оптимизации и роста.

Внедрение каталогизации каталогизация имеет большое значение для предприятий и позволяет максимально эффективно использовать их информационные ресурсы, но нужно понимать, что процесс её внедрения сопряжён с определёнными задачами, которые требуют грамотного подхода и организации. Только при должной организации всех этапов внедрения можно добиться оптимального использования каталогизации в интересах предприятия. Для успешной реализации данного процесса необходимо обеспечить:

- Привлечение внимания пользователей, ключевое значение для успешного внедрения и эффективного применения каталогизации на предприятиях имеют пользователи. Привлечение внимания пользователей способствует формированию чувства вовлеченности и

упрощает использование каталога данных на предприятиях. Важно вовлекать пользователей на ранних этапах процесса внедрения каталогов данных, собирать их отзывы, решать возникающие проблемы и адаптировать каталоги под их индивидуальные потребности, разработать комплексные учебные программы, обучения или семинары для ознакомления пользователей с особенностями, функциями и практическими навыками использования каталога данных;

- Предоставление постоянной поддержки и помощи при работе с каталогом, создание специализированной группы поддержки для решения запросов пользователей, устранения проблем и предоставления рекомендаций по использованию дополнительных возможностей каталога помогут пользователям эффективно исследовать каталоги и полностью реализовать их потенциал для поиска и анализа данных;

- Создание эффективной функции поиска, дающей пользователям возможность быстро находить нужные активы данных в каталоге, увеличивают шансы на обнаружение информации и упрощают самостоятельное изучение данных, используя поиск по ключевым словам, фильтрацию и фасетную навигацию.

- Предоставление пользователям возможности отслеживать источник, преобразование и движение информации на протяжении всего жизненного цикла, что, в свою очередь, обеспечивает ясное представление и упрощенное управление данными.

- Создание понятного и удобного интерфейса для повышения качества пользовательского опыта и успешного внедрения каталога данных, удовлетворяя различные запросы сотрудников на всех уровнях организации, такие как лёгкая навигация, средства визуализации и адаптируемые панели управления.

- Создание надежного хранилища метаданных, которое содержит полные описания метаданных для каждого актива, предоставляющее важные данные о свойствах и контексте информации, такие как источник данных, структура, происхождение информации и статистика использования;

- Возможность обнаруживать и извлекать информацию из всех ключевых источников компании, включая базы данных и системы хранения данных, объединение различных источников данных в каталог представляет собой сложный и ресурсоёмкий процесс.

- Высокий уровень качества и достоверности, для достижения этой цели может потребоваться автоматизация отдельных этапов

проверки данных, а также автоматическое обновление метаданных, структур и других элементов каталога данных.

- Сохранение способности к расширению, даже с увеличением объёма и усложнением данных каталога. Для этого требуется автоматизация ряда процессов управления данными и метаданными, например, обнаружение не востребуемых ресурсов, ускорение процесса создания документации для метаданных, а также внедрение классификаций для работы с конфиденциальной информацией.

- Безопасность и защиту персональной информации, это играет ключевую роль в поддержании целостности и приватности, а также в выполнении требований законодательства и нормативных стандартов по защите данных. В системе необходимо предусмотреть эффективные меры защиты, включая использование методов шифрования и управление доступом.

- Возможность приобретения, развёртывания и обслуживание каталога данных, учитывая, что эти процессы могут оказаться масштабными и потребовать значительных затрат для предприятия.

Рассмотрим внедрения каталогизации на примере торгово-производственного предприятия. Предприятие боролось с проблемой разрозненных источников данных, неупорядоченной технической документацией и несогласованной информацией между подразделениями. Это создавало препятствия для эффективного поиска данных и совместной работы, что, в свою очередь, снижало эффективность процессов принятия решений, замедляло выполнение поставленных задач и вело к снижению продаж.

Поставленные задачи:

1. Объединение данных. Создание единого каталога для аккумуляции разрозненной информации (о товарах, партнерах, заказах и документации) с интеграцией корпоративных систем через API для автоматизации взаимодействия и упрощения доступа.

2. Управление документацией. Оцифровка и систематизация технической документации (чертежи, инструкции, протоколы) в каталоге.

3. Присвоение метаданных. Автоматизация присвоения метаданных документам для упрощения поиска и актуализации.

4. Согласование данных. Создание единого источника достоверной информации, обеспечивающего прозрачное и автоматическое обновление данных между подразделениями.

5. Оптимизация поиска. Внедрение инструментов поиска (по ключевым словам, фильтрам) и интерфейсов, адаптированных под задачи отделов, с уведомлениями об изменениях.

6. Автоматизация управления. Автоматизация проверки данных, устранения дубликатов и обновления метаданных при изменениях структуры или характеристик.

7. Повышение взаимодействия. Создание общей платформы для работы с данными в реальном времени с ролевым доступом, позволяющим подразделениям использовать необходимые материалы.

8. Отслеживание источников. Введение функций для отслеживания изменений данных, их источников, времени и авторов обновлений.

9. Улучшение качества данных. Автоматизация очистки информации, устранение несоответствий и настройка правил проверки на этапе ввода данных.

10. Гибкость и масштабируемость. Создание адаптивной системы, способной расширяться с ростом бизнеса, с поддержкой автоматической интеграции новых источников и данных.

Результаты внедрения каталогизации на предприятии:

Сокращение времени на поиск данных, документов и другой информации стало возможным благодаря созданию централизованного хранилища и внедрению удобных инструментов для поиска. Увеличение продуктивности сотрудников обеспечивается за счет устранения дублирующих операций и оперативного доступа к актуальным сведениям. Снижение количества ошибок и несоответствий в данных способствует повышению качества продукции и улучшению уровня обслуживания клиентов. Ускорение процесса принятия решений достигается благодаря доступу к единой и достоверной информации. Усиление взаимодействия между отделами способствует лучшей координации и повышению эффективности деятельности компании.

Интеграция каталогизации с существующими системами управления данными имеет важное значение для повышения их эффективности и полезности: интеграция с хранилищами информации позволяет каталогам данных получать доступ к структурированным данным, размещённым в реляционных базах данных, и организовывать их каталогизацию. API или коннекторы могут использоваться для извлечения метаданных из схем хранилищ данных, обогащая каталог детальной информацией о доступных наборах данных.

Каталоги данных могут интегрироваться с озерами данных для каталогизации структурированных и неструктурированных данных, хранящихся в распределенных файловых системах или облачных озерах данных. Это позволяет пользователям изучать и анализировать данные через каталог, а также использовать инструменты бизнес-

аналитики для прямого доступа к данным из панелей мониторинга и отчетов BI, что упрощает принятие решений. Для защиты конфиденциальной информации и соблюдения требований обеспечивается управление данными и безопасность, включая детальный контроль доступа, который разрешает изменения и доступ только авторизованным пользователям.

Механизмы управления доступом на основе ролей позволяют администраторам определять роли и разрешения пользователей в зависимости от их профессиональных обязанностей и уровня конфиденциальности информации. Отслеживание происхождения данных в каталоге данных улучшает управление информацией, обеспечивая прозрачность их перемещения и преобразования данных. Такой процесс помогает предприятиям поддерживать целостность данных, проводить проверку их использования и обеспечивать соответствие нормативным требованиям. Каталоги данных должны соответствовать Федеральным законам № 152-ФЗ "О персональных данных", № 149-ФЗ "Об информации, информационных технологиях и о защите информации", № 323-ФЗ "Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации" и другим, для защиты конфиденциальных данных и поддержания соответствия нормативным требованиям. Реализация политик управления данными, механизмов шифрования и аудиторских следов помогает предприятиям выполнять нормативные обязательства и снижать правовые риски

Интеграция каталогов данных с системами управления информацией также позволяет усилить их гибкость в отношении изменений в бизнес-процессах и технологиях. Благодаря поддержке универсальных механизмов подключения к различным источникам информации, каталоги способны масштабироваться одновременно с увеличением объемов данных и появлением новых форматов источников. Это особенно значимо в условиях быстро меняющейся цифровой среды, когда компаниям необходимо своевременно приспосабливаться к изменениям и внедрять новшества. Вероятно, что управление метаданными на основе искусственного интеллекта радикально изменит процесс каталогизации данных за счет автоматизации задач создания, обогащения и обслуживания метаданных. Алгоритмы машинного обучения могут анализировать большие объемы данных для выявления шаблонов, отношений и аномалий, что повышает точность и полноту описания метаданных. Интеграция с инструментами машинного обучения и искусственного интеллекта открывает дополнительные перспективы для автоматического упорядочивания данных, прогнозирования трендов и

выявления скрытых взаимосвязей, что существенно ускоряет принятие важных решений. Будущее каталогизации данных приведет к значительному прогрессу, движимому новыми информационными технологиями.

В заключение следует отметить, что внедрение каталогизации предлагает многочисленные преимущества для предприятий, стремящихся оптимизировать процессы поиска информации и управления метаданными. Централизуя метаданные, предоставляя удобные и понятные инструменты для поиска и обеспечивая интеграцию с существующими системами, каталоги данных позволяют предприятиям использовать весь потенциал своих информационных активов. От улучшения процессов принятия решений до обеспечения соответствия нормативным требованиям и содействия инновациям каталогизация служит важнейшим инструментом для современных предприятий, помогает предприятиям быстрее адаптироваться к изменениям в условиях рынка, поддерживать долгосрочную устойчивость и развивать новые направления деятельности, открывает новые возможности для роста, эффективности и конкурентоспособности в мире, все больше управляемом данными.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Шелестов, А. Ю., Зорин, А. И. Проблемы защиты персональных данных в системах каталогизации – Вопросы безопасности информационных систем, 2020.

2. Лаптев, А. А., Чижов, М.В. Метаданные и их роль в системах управления данными – Информационные технологии и системы управления, 2019.

3. Сидорова, Н. В., Титов, К.Е. Автоматизация управления метаданными: подходы и технологии – Международный журнал управления данными, 2020.

УДК 004.65

**АНДРИАНОВ И.А., ДОНЦОВ Д.В.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

#### **ВЫБОР НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ УМНЫЙ ДОМ**

*В данной статье рассматриваются 3 основные технологии для построения системы передачи информации, их преимущества и недостатки.*

Умные дома становятся всё более популярными, и ключевую роль в их функциональности играют беспроводные протоколы связи. В данной статье рассматриваются три основных протокола: Wi-Fi, Bluetooth и Z-Wave, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки[1].

#### *Технология Wi-Fi*

Технология Wi-Fi широко используется в устройствах умного дома благодаря своей универсальности, высокой скорости передачи данных и возможности работы без прямого подключения к устройствам (беспроводная связь). Вот основные аспекты её применения:

1. Подключение устройств к сети и управление через интернет:

- Устройства умного дома (светильники, термостаты, камеры, датчики и т.д.) подключаются к домашней Wi-Fi сети;
- Через эту сеть они могут быть доступны для управления как локально (смартфон, планшет), так и удалённо (через облачные сервисы).

2. Обмен данными между устройствами:

Wi-Fi позволяет устройствам обмениваться информацией друг с другом. Например, датчик движения может отправить сигнал на умную камеру для записи видео при обнаружении активности.

3. Высокая скорость передачи данных:

Wi-Fi подходит для устройств, которым требуется передавать большие объёмы данных в реальном времени, например, видеонаблюдение или потоковая передача аудио.

4. Простота настройки:

Wi-Fi не требует дополнительных проводов, что делает установку устройств простой и удобной.

Ограничения:

1. Энергопотребление: Wi-Fi может потреблять много энергии, поэтому его использование ограничено для устройств с батарейным питанием (например, датчиков).

2. Помехи и перегрузка сети: В загруженных сетях возможны задержки и снижение качества работы.

Таким образом, Wi-Fi является ключевой технологией для создания экосистем умного дома, обеспечивая надёжное подключение и управление устройствами через единую сеть.

#### *Технология Bluetooth*

Технология Bluetooth, особенно её низкоэнергетическая версия (Bluetooth Low Energy, BLE), активно используется в устройствах

умного дома благодаря своей энергоэффективности и простоте подключения. Вот основные аспекты её применения:

1. Подключение устройств к смартфонам и шлюзам:

Bluetooth позволяет напрямую подключать устройства умного дома (например, датчики, умные лампы, замки) к смартфону или планшету для настройки и управления. Устройства также могут подключаться к центральным шлюзам (хабам), которые затем передают данные через Wi-Fi или другие протоколы.

2. Энергоэффективность:

BLE потребляет значительно меньше энергии по сравнению с Wi-Fi, что делает его идеальным для устройств с батарейным питанием, таких как датчики температуры, движения, открытия дверей или окон.

3. Локальное управление без интернета:

Bluetooth работает в локальном режиме, что позволяет управлять устройствами даже при отсутствии интернета или Wi-Fi. Например, можно включить свет или проверить состояние датчика напрямую через смартфон.

4. Простота настройки:

Подключение устройств через Bluetooth обычно не требует сложной настройки. Достаточно включить устройство в режим сопряжения и подключиться через мобильное приложение.

Ограничения:

1. Ограниченный радиус действия: Bluetooth работает на коротких расстояниях (до 10–30 метров внутри помещений), что может быть недостатком для больших домов.

2. Низкая пропускная способность: Bluetooth не подходит для передачи больших объёмов данных, таких как видеопотоки.

Итог: Bluetooth, особенно BLE, является важной технологией для устройств умного дома, где требуется энергоэффективность, простота подключения и работа на коротких расстояниях. Она идеально подходит для датчиков, небольших аксессуаров и устройств с ограниченным энергопотреблением. Однако для более сложных задач (например, видеонаблюдение или управление через интернет) часто требуется дополнительная интеграция с другими технологиями, такими как Wi-Fi или Z-Wave.

*Технология Z-Wave*

Технология Z-Wave – это беспроводной протокол связи, специально разработанный для устройств умного дома. Она отличается низким энергопотреблением, стабильностью работы и



способностью создавать сети с ячеистой топологией (mesh network) . Вот основные аспекты её использования:

1. Ячеистая сеть (Mesh Network):

Z-Wave позволяет устройствам взаимодействовать друг с другом через сеть, где каждое устройство может передавать сигнал дальше. Это увеличивает радиус действия сети без необходимости установки дополнительных роутеров.

2. Стабильность и надёжность:

Z-Wave работает на частоте 868 МГц (в Европе) или 908 МГц (в США) , что отличается от загруженных Wi-Fi и Bluetooth диапазонов. Это минимизирует помехи и обеспечивает более стабильное соединение. Протокол поддерживает шифрование данных (AES-128), что гарантирует безопасность передачи информации.

3. Поддержка широкого спектра устройств:

Z-Wave совместим с множеством устройств умного дома: освещение, термостаты, замки, датчики, жалюзи и т. д. Все устройства сертифицированы для совместимости, что исключает проблемы с работой разных брендов.

Ограничения:

Ограниченная скорость передачи данных: Z-Wave не подходит для устройств, которым требуется передача больших объёмов данных (например, видеонаблюдение).

Стоимость: Устройства Z-Wave часто дороже аналогов, использующих другие технологии (например, Zigbee).

Z-Wave это надёжная и энергоэффективная технология, идеально подходящая для создания стабильных сетей умного дома. Она особенно популярна там, где важны простота настройки, безопасность и работа на больших расстояниях. Однако для сложных задач или экономичных решений могут потребоваться дополнительные технологии, такие как Wi-Fi или Zigbee.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Miorandi, D., Sicari, S., DePellegrini, F., &Chlamtac, I. (2012). "Internet of Things: Vision, Applications and Research Challenges." \*Ad Hoc Networks\*, 10(7), 1497-1516.

2. Wi-Fi, Bluetooth, Z-Wave или ZigBee: какой протокол умного дома выбрать [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ixbt.com/live/home/wi-fi-bluetooth-z-wave-ili-zigbee-kakoy-protokol-umnogo-doma-vybrat.html> (Дата обращения: 27.10.2024).

УДК 004.65

**АНДРИАНОВ И.А., ДОНЦОВ Д.В.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**МЕТОДЫ ИНТЕГРАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ УСТРОЙСТВ  
В ЭКОСИСТЕМУ ЯСМАРТ (ЯНДЕКС УМНЫЙ ДОМ)**

*В данной статье рассматриваются 3 основных метода интеграции пользовательских устройств в экосистему Яндекс умный дом.*

Современные технологии стремительно развиваются, и концепция "умного дома" становится всё более популярной. Одной из ведущих платформ для управления умным домом в России является Яндекс Умный дом. Она позволяет объединить устройства различных производителей в единую систему и управлять ими через мобильное приложение или голосовых помощников (например, Яндекс.Станция).

Однако не все устройства совместимы с экосистемой Яндекса "из коробки". Это особенно актуально для пользователей, которые создают собственные устройства или используют оборудование сторонних производителей. В таких случаях на помощь приходит универсальный контроллер DS3mini, который можно использовать для создания пользовательских устройств и их интеграции в экосистему Яндекс Умный дом.

Цель данной статьи — описать методы интеграции пользовательских устройств на базе контроллера DS3mini в экосистему Яндекс Умный дом, а также рассмотреть преимущества и ограничения каждого подхода.

### *1. Обзор контроллера DS3mini*

DS3mini – это компактный и универсальный контроллер, предназначенный для создания пользовательских устройств умного дома. Он поддерживает различные интерфейсы связи, такие как Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE) и UART, что делает его идеальным решением для разработки устройств с широкими возможностями.

Основные характеристики DS3mini:

- Поддержка Wi-Fi и BLE.
- Программируемость через SDK или готовые прошивки.
- Возможность работы с протоколами MQTT и HTTP.
- Компактность и низкое энергопотребление.

Преимущества DS3mini:

- Гибкость: Контроллер можно использовать для создания широкого спектра устройств: от умных розеток до сложных датчиков.

- Энергоэффективность: Низкое потребление энергии позволяет использовать DS3mini в устройствах с батарейным питанием.

- Лёгкая интеграция: Поддержка стандартных протоколов (MQTT, HTTP) упрощает подключение к облачным сервисам.

## 2. Особенности экосистемы Яндекс Умный дом

Яндекс Умный дом – это платформа, объединяющая устройства различных производителей для управления освещением, климатом, безопасностью и другими аспектами дома. Она доступна через мобильное приложение или голосовые помощники, такие как Яндекс.Станция.

Требования к устройствам:

- Поддержка протоколов MQTT, HTTP или других стандартов.
- Совместимость с API Яндекса.
- Возможность управления через облачные сервисы.

Ограничения:

- Не все устройства могут быть интегрированы напрямую в экосистему. Для этого требуются дополнительные решения, такие как промежуточные шлюзы или программирование.

## 3. Методы интеграции DS3mini в Яндекс Умный дом

### 3.1. Интеграция через MQTT

MQTT – это лёгкий протокол для передачи данных между устройствами. Яндекс Умный дом поддерживает MQTT для взаимодействия с внешними устройствами.

Шаги интеграции:

- Настройка MQTT-брокера (например, Mosquitto).
- Программирование DS3mini для отправки данных в брокер.
- Настройка подключения брокера через API.

Пример использования:

Умная розетка на базе DS3mini может отправлять данные о состоянии (включена/выключена) через MQTT, которые затем отображаются в приложении Яндекса.

### 3.2. Интеграция через HTTP API

HTTP API – это стандартный способ взаимодействия с серверами Яндекса. DS3mini может отправлять HTTP-запросы на сервер Яндекса для передачи данных.

Шаги интеграции:

- Создание скрипта на DS3mini для отправки HTTP-запросов.
- Настройка авторизации через OAuth.
- Тестирование работы устройства в приложении Яндекса.

Пример использования:

Датчик температуры на базе DS3mini может отправлять показания через HTTP API, которые затем отобразятся в приложении.

### 3.3. Интеграция через шлюз (Yandex IoT Gateway)

DS3mini не поддерживает прямую интеграцию, можно использовать промежуточный шлюз, например, Raspberry Pi с установленным Yandex IoT Gateway.

Шаги интеграции:

- Установка шлюза и его настройка;
- Подключение DS3mini к шлюзу через Wi-Fi или BLE;
- Передача данных от DS3mini через шлюз в Яндекс Умный

дом.

Пример использования:

Умный светильник на базе DS3mini управляет яркостью через шлюз, который передаёт команды в приложение Яндекс.

### 4. Преимущества и ограничения интеграции

Преимущества:

- Гибкость: Возможность создавать уникальные устройства.
- Совместимость: DS3mini поддерживает множество

протоколов.

- Автономность: локальная работа или через облако.

Ограничения:

- Сложность настройки для начинающих пользователей.
- Зависимость от стабильности интернета при работе через

облако.

- Ограниченная поддержка некоторых функций Яндекса.

Интеграция пользовательских устройств на базе контроллера DS3mini в экосистему Яндекс Умный дом возможна через протоколы MQTT, HTTP API или шлюз. Каждый метод имеет свои преимущества и подходит для разных задач.

Развитие технологий и расширение поддержки протоколов сделают интеграцию ещё проще и доступнее для широкого круга пользователей. Пользователи смогут создавать уникальные устройства, которые будут полностью соответствовать их потребностям, и легко управлять ими через единую платформу Яндекс Умный дом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. HiveMQTeam. MQTTEssentials: ALightweightIoTProtocol [Электронный ресурс] / HiveMQTeam. – Режим доступа: <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/> (дата обращения: 25.03.2025).

2. Norris, D. Building Smart Homes with Raspberry Pi and ESP32 / Donald Norris. – USA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2020. – 350 с.

3. Yandex IoT Gateway [Электронный ресурс] : GitHub repository / Yandex Community. – Режим доступа: <https://github.com/yandex/iobroker.yandex> (дата обращения: 25.03.2025).

4. Яндекс Умный дом. Официальная документация API [Электронный ресурс] / Яндекс. – Режим доступа: <https://yandex.ru/dev/dialogs/smart-home/doc/about.html> (дата обращения: 25.03.2025).

5. DS3miniSDKDocumentation [Электронный ресурс] / DS3miniOfficialWebsite. – Режим доступа: <https://www.ds3mini.com/docs/> (дата обращения: 25.03.2025).

УДК 004.932

**АНТОНУШКИНА С.Д., КНЯЗЬКОВ П.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ  
ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЗЗ ОТ ДАТЧИКОВ  
СКАНОВОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ**

*Рассматривается задача разработки перспективной программной технологии автоматического определения дефектов оптических изображений дистанционного зондирования Земли от датчиков сканового принципа. Приводятся примеры дефектов изображений, описываются признаки и алгоритм их определения.*

На современном этапе развития технологий работы с оптическими изображениями дистанционного зондирования (ДЗЗ) созданы предпосылки для их автоматической обработки, каталогизации и распространения потребителю. Это значит, что принятые со спутника ДЗЗ потоки информации могут быть автоматически распакованы и обработаны до стандартного уровня L0, далее сохранены в каталог данных, переданы потребителю или обработаны до более высоких стандартных уровней и потом переданы в каталог данных или потребителю.

Использование автоматических процедур обработки информации подразумевает необходимость разработки автоматической технологии определения качества информации с точки

зрения наличия дефектов, поскольку получаемая информация должна сопровождаться маской качества, которая определяет пригодность информации для обработки выше уровня L0, целесообразность ее сохранения или передачи потребителю.

Автоматическая технология оценки качества изображения с точки зрения обнаружения дефектов предполагает ее применение с 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 [1], под дефектом понимается особенность данных дистанционного зондирования Земли из космоса, которая искажает их радиометрические, пространственно-частотные и координатно-измерительные характеристики.

*Формирование изображений в датчиках сканового принципа действия*

При разработке программной технологии автоматического обнаружения дефектов изображений от целевой аппаратуры космических систем ДЗЗ сканового принципа действия рассмотрим принцип формирования такого изображения, который хорошо описан в литературе [2, 3]. В таких системах строка изображения создается за счет опроса строки фоточувствительной матрицы на основе прибора с зарядовой связью (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 1. Расположение темных участков на изображении, которые по ширине соответствуют размеру ПЗС-матриц, отражает разнесение положения ПЗС-матриц в фокальной плоскости. При таком размещении ПЗС-матриц на границе соседних сканов рядом наблюдаются одноименные объекты. Первые столбцы изображения также могут содержать служебную информацию.



Рисунок 1 – Модель изображения ДЗЗ от датчика сканового принципа действия

*Дефекты изображений от целевой аппаратуры сканового принципа действия*

Согласно [1], приведем примеры некоторых дефектов оптических изображений и определим их признаки на основе гистограммы сканов изображения маршрута съемки для таких дефектов. 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 распространенном 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 значение 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.

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 представлен слева на рисунке 2.

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 представлен справа на рисунке 2.

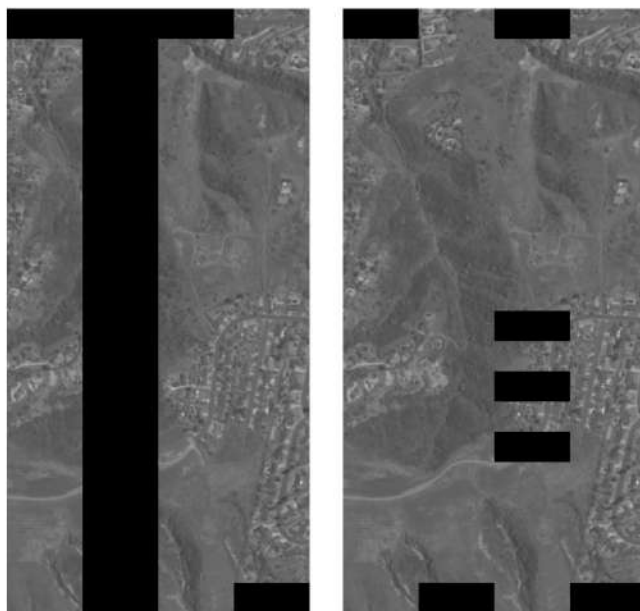


Рисунок 2 – изображение с дефектом потери информации 2-й ПЗС-матрицы (слева), изображение с дефектом частичной потери информации 3-й ПЗС-матрицы (справа)

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

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

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

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

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

Пример изображения с дефектом недоэкспозиции представлен слева на рисунке 3.

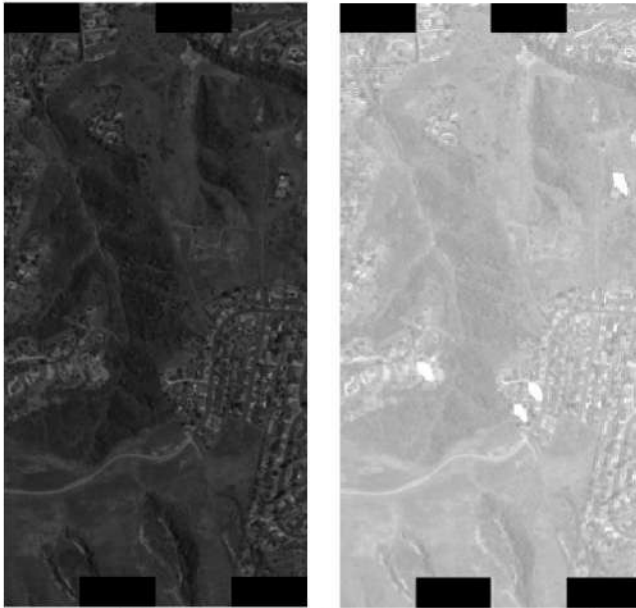


Рисунок 3 – Изображение с дефектом недоэкспозиции (слева), изображение с дефектами переэкспозиции и блюминга (справа)

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 представлен справа на рисунке 3.

#### 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 представлен справа на рисунке 3.

#### *Технология автоматического определения дефектов*

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

Шаг 1. Получение исходных данных настроек алгоритма под вид анализируемого изображения.

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 4.

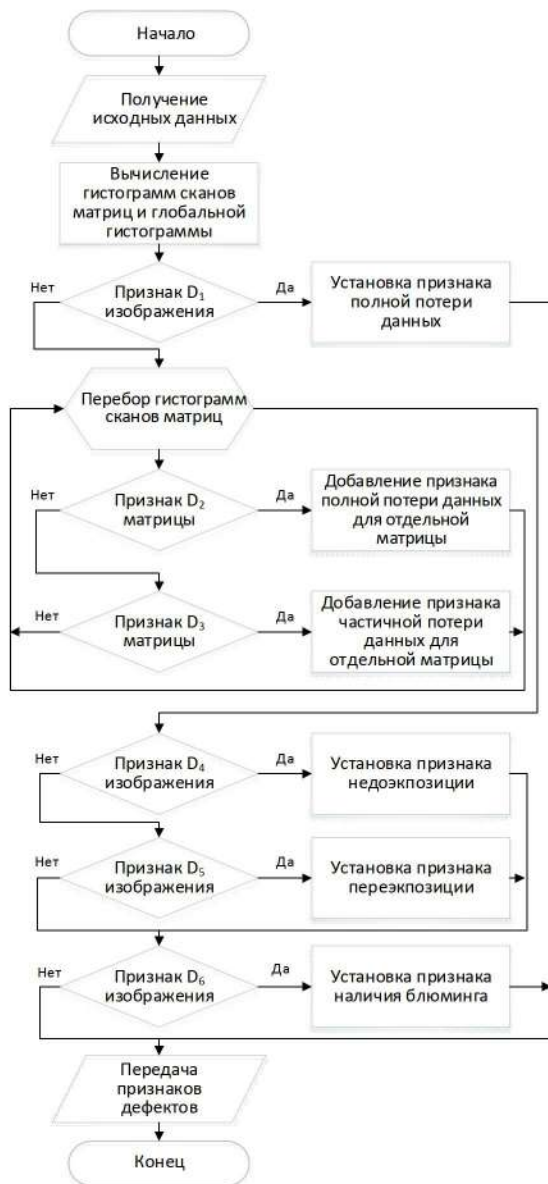


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма автоматического определения дефектов изображения на основе введенных признаков

После анализа изображения передача признаков дефектов R 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.

С целью обеспечения высокой доступности технологии и упрощения применения спроектируем интерфейс, который будет удовлетворять различным сценариям использования. Для настройки и штатной эксплуатации технологии определим три программных интерфейса запуска процедуры автоматического определения дефектов изображения, взаимодействие с которыми отображено на рисунке 5.

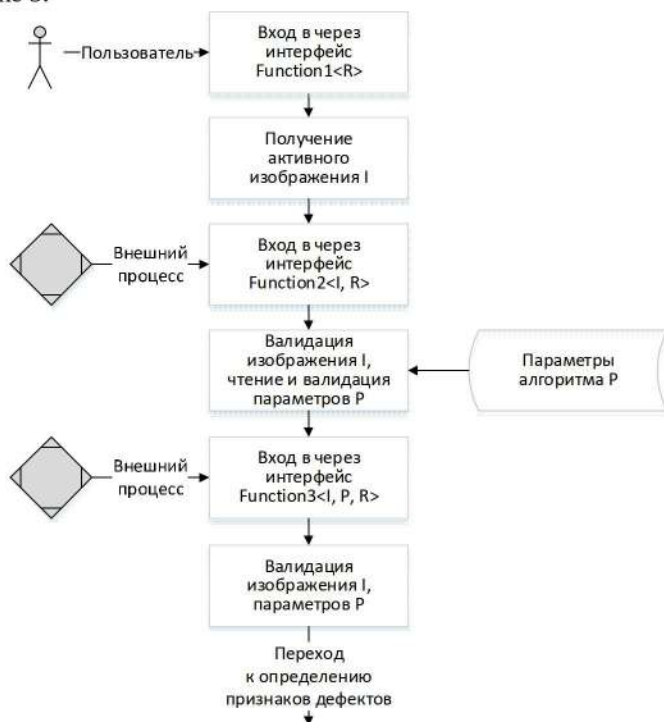


Рисунок 5 – Блок-схема взаимодействия программных интерфейсов запуска процедуры автоматического определения дефектов изображения

Программные интерфейсы запуска процедуры автоматического определения дефектов изображения:

- функция  $\text{Function1}\langle R \rangle$  с захватом активного изображения программы при запуске пользователем;
- функция  $\text{Function2}\langle I, R \rangle$  с получением изображения для анализа через программный вызов;
- функция  $\text{Function3}\langle I, P, R \rangle$  с получением изображения и параметров алгоритма определения дефектов через программный вызов.

Интерфейс функции  $\text{Function1}$  с захватом активного изображения применяется в процессе экспертной настройки параметров и отладки алгоритма.

В результате своей работы она получает активное изображение и вызывает функцию  $\text{Function2}$  с передачей изображения для анализа через программный вызов.

Функция  $\text{Function2}$  считывает параметры для процедуры определения дефектов и вызывает функцию  $\text{Function3}$  с передачей изображения и параметров алгоритма определения дефектов через программный вызов.

Функции  $\text{Function2}$  и  $\text{Function3}$  используются при штатной эксплуатации с вызовом из внешних процессов в автоматическом режиме.

#### *Выводы*

В настоящей работе выполнена проработка программной технологии автоматического определения дефектов оптических изображений ДЗЗ, сформированных датчиками сканового принципа действия, на основе введения признаков дефектов для гистограмм сканов и гистограммы целого изображения, которая позволяет обнаруживать следующие дефекты:

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

Данная программная технология является экономичной по ресурсам, поскольку для анализа изображения маршрута съемки требуется однократное чтение изображения для построения гистограмм. Предполагается использовать данную технологию для обеспечения процедур обработки, хранения, и распространения данных ДЗЗ.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. 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.
2. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. Монография. – Под ред. В.В. Еремеева. – М.: Физматлит, 2015. – 460 с.
3. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.

УДК 621.372.54

**АРИСТАРХОВ А.В.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО  
ФНЧ В ANSYS HFSS: УГЛУБЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ПРИМЕНЕНИЯ**

*В работе представлен детальный анализ возможностей пакета ANSYS HFSS для моделирования микрополосковых фильтров нижних частот. Проведено сравнение трех численных методов (FEM, MoM, FDTD) с точки зрения точности, вычислительной эффективности и практической применимости. Разработаны рекомендации по выбору алгоритма моделирования в зависимости от решаемой задачи.*

Микрополосковые фильтры нижних частот занимают важное место в современных радиочастотных и СВЧ-устройствах благодаря своей компактности, технологичности изготовления и хорошим частотным характеристикам. Их широкое применение в системах связи, радиолокации и измерительной технике требует точных методов проектирования, особенно когда речь идет о работе в высокочастотных диапазонах. Традиционные аналитические методы расчета, основанные на квазистатическом приближении, часто оказываются недостаточно точными для современных задач, что делает компьютерное моделирование неотъемлемой частью процесса разработки.

Одним из наиболее мощных инструментов для электромагнитного моделирования является пакет ANSYS HFSS,

который предлагает несколько численных методов для анализа СВЧ-структур. Выбор конкретного метода существенно влияет как на точность результатов, так и на требуемые вычислительные ресурсы. В данной работе рассматриваются три основных подхода: метод конечных элементов (FEM), метод моментов (MoM) и метод конечных разностей во временной области (FDTD), каждый из которых имеет свои особенности применения при моделировании микрополосковых фильтров.

Основные параметры микрополоскового фильтра определяются через расчет волнового сопротивления линии, который выполняется по формуле:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r} + 1.41} \ln \left( \frac{5.98h}{0.8\omega + t} \right) [\text{Ом}], \quad (1)$$

где  $\epsilon_r$  представляет относительную диэлектрическую проницаемость материала подложки,  $h$  - толщину подложки,  $\omega$  - ширину проводника, а  $t$  - его толщину. Эффективная диэлектрическая проницаемость, учитывающая влияние неоднородной среды, рассчитывается как:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + \frac{12h}{\omega}}}, \quad (2)$$

Длина резонансного элемента фильтра определяется выражением:

$$l = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света, а  $f$  – частота среза фильтра. Эти базовые расчеты служат отправной точкой для последующего компьютерного моделирования, которое позволяет уточнить параметры и оптимизировать характеристики устройства.

Метод конечных элементов (FEM), реализованный в ANSYS HFSS в качестве основного алгоритма, основан на разбиении расчетной области на множество тетраэдральных элементов. Адаптивный процесс измельчения сетки в областях с большими градиентами поля обеспечивает высокую точность результатов, особенно для сложных трехмерных структур. Однако этот метод требует значительных вычислительных ресурсов, что может ограничивать его применение при моделировании крупных или сложных систем. Время расчета существенно зависит от степени измельчения сетки и сложности геометрии моделируемого устройства.

Метод моментов (MoM), доступный через модуль IntegralEquation в ANSYS HFSS, особенно эффективен для анализа



планарных и тонкопленочных структур. Его основное преимущество заключается в меньших требованиях к памяти и более высокой скорости расчета по сравнению с FEM для определенного класса задач. Однако точность МоМ может снижаться при моделировании объемных структур или при наличии сложных граничных условий. Этот метод хорошо подходит для предварительного анализа и оптимизации геометрии фильтра на ранних этапах проектирования.

Метод конечных разностей во временной области (FDTD) реализован через опцию Transient в ANSYS HFSS и особенно полезен для анализа широкополосных характеристик и переходных процессов. Его основное преимущество - возможность получения полного частотного отклика за одно моделирование. Однако FDTD требует особенно тщательного выбора параметров дискретизации по времени и пространству для обеспечения устойчивости решения, что делает его наиболее требовательным к вычислительным ресурсам среди рассматриваемых методов.

Ниже приведена сравнительная таблица с анализом характеристик различных методов моделирования (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ характеристик различных методов моделирования

Параметр	FEM	МоМ	FDTD
Время расчета, мин	8.2	5.7	12.5
Используемая память, ГБ	3.1	2.4	4.8
Погрешность $f_c$ , %	1.2	2.5	0.8
Пульсации в полосе, дБ	0.05	0.12	0.03

Анализ амплитудно-частотных характеристик, полученных разными методами, показывает, что все три подхода в целом правильно описывают поведение фильтра, но с различной степенью точности в разных частотных диапазонах. Метод FEM демонстрирует плавную характеристику с минимальными пульсациями в полосе пропускания, что делает его особенно полезным для анализа фильтров с жесткими требованиями к равномерности характеристики. МоМ дает несколько большие пульсации и небольшой подъем характеристики вблизи частоты среза, что может быть важно при проектировании фильтров с особыми требованиями к форме АЧХ. FDTD обеспечивает

наиболее точное соответствие теоретическим расчетам, особенно в области перехода из полосы пропускания в полосу задерживания.

Для количественной оценки точности моделирования использовался показатель PSNR (пиковое отношение сигнал-шум), рассчитываемый по формуле:

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{MAX_i^2}{MSE} \right) [\text{дБ}], \quad (4)$$

где  $MAX_i = 255$  представляет максимально возможное значение сигнала, а  $MSE$  – среднеквадратическую ошибку между моделируемыми и эталонными данными. Полученные значения PSNR составили 42 дБ для FEM, 38 дБ для МоМ и 45 дБ для FDTD, что подтверждает более высокую точность последнего метода, но и его большую вычислительную сложность.

Практические рекомендации по выбору метода моделирования должны учитывать как требования к точности, так и доступные вычислительные ресурсы. Для начальных этапов проектирования, когда важна скорость получения результатов, целесообразно использовать МоМ. Этот метод позволяет быстро оценить основные параметры фильтра и провести предварительную оптимизацию геометрии. На этапе детального проектирования следует переходить к FEM, который обеспечивает хороший баланс между точностью и временем расчета. Для окончательной проверки критически важных параметров или при наличии особо жестких требований к характеристикам фильтра рекомендуется применять FDTD, несмотря на его высокую вычислительную стоимость.

Важным аспектом повышения эффективности моделирования является правильный выбор параметров расчетной сетки. Для FEM рекомендуется использовать адаптивное измельчение сетки с контролем ошибки решения. В случае МоМ следует обратить внимание на параметры дискретизации поверхностей, а для FDTD критически важным является выбор временного шага, удовлетворяющего критерию Куранта. Оптимизация этих параметров позволяет существенно сократить время расчета без значительной потери точности.

Перспективным направлением развития методов моделирования микрополосковых фильтров является разработка гибридных алгоритмов, сочетающих преимущества разных подходов. Например, комбинация МоМ для анализа планарных элементов и FEM для моделирования объемных компонентов может обеспечить хороший компромисс между точностью и вычислительной эффективностью. Другим интересным направлением является применение методов

машинного обучения для предсказания оптимальных параметров сетки и ускорения процесса моделирования.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гусев Н.М., Карлов А.В. Микроразомкнутые устройства СВЧ. – М.: Радио и связь, 2019. – 420 с.
2. ANSYS HFSS Technical Reference Manual. – 2024 Edition. – 780 p.
3. Zhang X., Wang Y. Advanced Computational Electromagnetics. – Springer, 2023. – 350 p.
4. Петров А.А., Сидоров В.Н. Компьютерное моделирование в радиоэлектронике. – Рязань: РГРТУ, 2022. – 315 с.
5. Microwave Engineering: Principles and Applications / Ed. by M. Schneider. – 3rd ed. – Wiley, 2023. – 860 p.
6. Johnson J.M. Numerical Methods for Electromagnetic Simulation. – CRC Press, 2022. – 410 p.
7. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2023. – Vol. 71, No. 5.
8. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2024. – Vol. 34, No. 2.

УДК 004.65

### АРУТЮНОВА А.В., САПРЫКИН А.Н.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САПР SOLIDWORKS ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ

*В статье пошагово описывается процесс проектирования сборочной единицы в САПР SolidWorks. Приведены используемые методы детализирования и графического масштабирования. Подробно рассматриваются основные этапы моделирования составных частей проектируемой сложной детали на примере клапана, предназначенного для изменения величины потока воды.*

Современные технологии проектирования и производства сталкиваются с растущими требованиями к точности, эффективности и инновационности. В этом контексте системы автоматизированного проектирования (САПР) играют ключевую роль, обеспечивая инженерам и дизайнерам мощные инструменты для создания и оптимизации сложных деталей. Одним из наиболее популярных

программных решений в этой области является SolidWorks, который предлагает широкий спектр возможностей для трехмерного моделирования, симуляции и анализа.

Трехмерное проектирование становится особенно актуальным при разработке сложных деталей, где традиционные методы проектирования могут оказаться неэффективными. SolidWorks предоставляет интуитивно понятный интерфейс и мощные функциональные возможности, позволяя пользователям легко создавать, изменять и анализировать трехмерные модели. Система поддерживает различные стадии проектирования, включая концептуальное проектирование, детализацию и подготовку к производству, что делает ее универсальным инструментом для инженеров различных отраслей.

В статье пошагово рассматривается процесс проектирования узла сборочной единицы. Описываются ключевые этапы, уделяется внимание особенностям работы в SolidWorks. Наглядно иллюстрируется, как данная САПР позволяет не только сократить время разработки, но и повысить качество проектируемых изделий.

*Описание назначения деталей узла разрабатываемой сборочной единицы*

Проектируемая деталь представляет собой клапан (рисунок 1), который предназначен для изменения величины потока воды, проходящей по трубопроводу, а также для периодических отключений одной части трубопровода от другой.

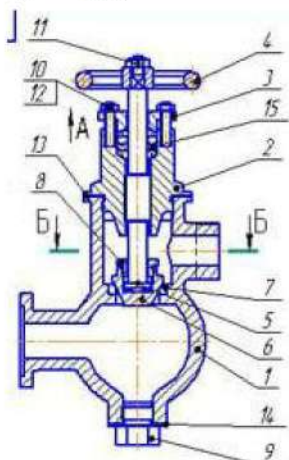


Рисунок 1 – Клапан

Клапан состоит из корпуса (позиция 1) и крышки (позиция 2). Детали в позициях 5, 6 и 8 являются запорным устройством. Изменение проходного отверстия между клапаном (позиция 6) и седлом (позиция 7) регулируется вращением маховичка (позиция 4). В качестве уплотнения между шпинделем (позиция 5), крышкой (позиция 2) и фланцем (позиция 3) применяют войлочные кольца (позиция 15), пропитанные смазочными веществами. По мере износа войлочные кольца поджимаются фланцем, для чего завинчивают гайки (позиция 10). Стык крышки и корпуса уплотнен прокладкой (позиция 14). Пробка (позиция 9) предназначена для слива и очистки корпуса.

*Детализирование чертежа общего вида и определение натуральных размеров деталей*

Для детализирования данного узла сперва необходимо определить натуральные размеры по чертежу общего вида. Определение натуральных размеров деталей будем осуществлять при помощи графического метода.

Этот способ состоит в следующем: размеры сборочного чертежа следует соотнести с их истинной величиной на чертеже при помощи построения графика пропорционального масштабирования, содержащего две оси. Вертикальная ось ОУ, на которую откладывается величина размера, измеренная на сборочном чертеже и горизонтальная ось ОХ, на которую откладываем натуральную величину размера. Через полученные засечки проводим вертикальную и горизонтальную линии до их пересечения. Построенную точку соединяем с началом координат. Так получаем график пропорционального масштаба. Чтобы по этому графику определить натуральный размер детали, измеренный по чертежу размер откладываем на вертикальной оси. Затем проводим горизонтальную линию до пересечения с графиком. От точки на графике проводим вертикальную линию вниз до пересечения с горизонтальной осью. Полученный на горизонтальной оси отрезок является натуральной величиной длины детали.

*Описание 3D моделей деталей и узла сборочной единицы, выполненных в среде SolidWorks*

Этапы моделирования детали корпуса включали в себя создание цилиндра с размером, равным габаритным размерам стакана, после чего при помощи команды *вытянутый вырез* формировались все необходимые по сборочному чертежу отверстия. Следующим этапом при помощи команд *фаска* и *скругление* создавалась окончательная форма детали.

Дерево конструирования корпуса представлено на рисунке 2.

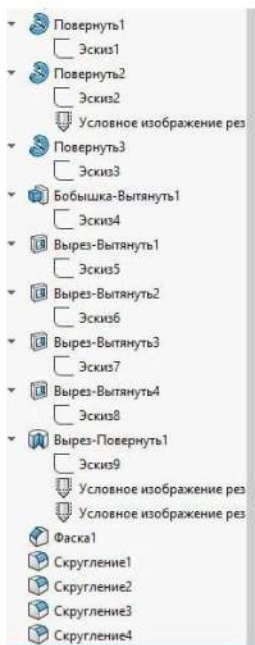


Рисунок 2 – Дерево конструирования детали «Корпус»

Трехмерная модель спроектированной детали представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Трехмерная модель детали «Корпус»

Этапы моделирования детали крышки (упорной гайки) заключались в создании цилиндрического диска с размером, равным габаритным размерам упорной гайки. Далее в детали формировались необходимые по сборочному чертежу отверстия и фаски.

Трехмерная модель спроектированной детали представлена на рисунке 4.

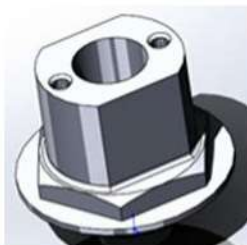


Рисунок 4 – Трехмерная модель детали «Крышка»

Итоговая трехмерная модель узла сборочной единицы (клапана) представлена ниже. Сопряжение деталей в дереве конструирования показано на рисунке 5, а трехмерная модель узла сборочной единицы представлена на рисунке 6.

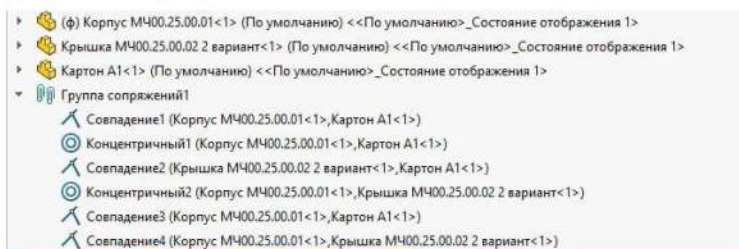


Рисунок 5 – Дерево конструирования сборочной единицы



Рисунок 6 – Трехмерная модель сборочной единицы

В результате моделирования была разработана конструкторская документация на сборочную единицу, включающая трехмерные модели и чертежи деталей в САПР Solid Works, а также получена

необходимая спецификация. Это обеспечило полное представление о конструкции изделия и его компонентах, что необходимо для его дальнейшего производства и эксплуатации.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что основные инструменты, используемые в САПР SolidWorks для трехмерного проектирования, включают в себя функции моделирования твердотельных и поверхностных объектов, что позволяет инженерам создавать сложные геометрические формы с высокой степенью точности. Инструменты, такие как Extrude, Revolve и Sweep, предоставляют пользователям возможность преобразовывать двумерные эскизы в трехмерные модели, а также комбинировать различные элементы для создания более сложных конструкций.

Кроме того, SolidWorks предлагает мощные инструменты для анализа и верификации проектируемых изделий. Модули для симуляции механических свойств, таких как прочность и жесткость, позволяют проводить инженерный анализ непосредственно в процессе проектирования, что значительно сокращает время на доработку и тестирование. Интеграция CAD и CAE в систему проектирования обеспечивает непрерывный поток данных, позволяя проектировщикам быстро вносить изменения и оптимизировать конструкции, что в конечном итоге приводит к повышению качества и конкурентоспособности разрабатываемых продуктов.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. ГОСТ 2.743-91 Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники.
2. ГОСТ 2.123-93 Единая система конструкторской документации. Комплектность конструкторских документов на печатные платы при автоматизированном проектировании.

УДК 621.3.049.77

**БЕЛИКОВ М.А., ИЛЬИНЫХ В.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ОСОБЕННОСТИ КОМПОНОВКИ ЭЛЕКТРОНИКИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

*В данной статье рассматриваются инженерные подходы к повышению надёжности электронной аппаратуры в условиях перегрева. Основное внимание уделено*



*принципам компоновки, подбору материалов и применению современных технологий охлаждения, а также приводятся реальные примеры промышленных решений.*

### *Введение*

При проектировании электронных устройств для работы в условиях высокой температуры необходимо уделять особое внимание компоновке элементов внутри корпуса. Перегрев компонентов может привести к деградации их характеристик, сокращению срока службы и выходу из строя. Устройства, используемые в промышленности, транспорте, военной технике и системах автоматизации, часто работают при температурах выше +60 °С, а иногда и в экстремальных условиях свыше +100 °С. Учитывая этот фактор, инженер должен проектировать компоновку таким образом, чтобы минимизировать тепловые воздействия на чувствительные узлы.

#### *Влияние повышенной температуры на электронику*

При температуре свыше 85 °С:

- среднее время наработки на отказ у полупроводников снижается на 50–70%;
- ёмкость электролитических конденсаторов падает, а ток утечки возрастает;
- чипы микроконтроллеров и микросхем выходят за пределы допустимых режимов.

Пример: типовой микроконтроллер семейства STM32 допускает работу до +85 °С (коммерческий класс) или до +125 °С (промышленный класс). При превышении этих значений возможны сбои в логике работы, вплоть до отказа.

#### *Общие принципы компоновки при тепловых ограничениях*

1. Пространственная изоляция источников тепла. Источники тепла (например, трансформаторы, силовые транзисторы) не должны располагаться рядом с микросхемами логики и микроконтроллерами. Идеальная стратегия — физическое разделение блоков питания и управления, размещение в разных отсеках или углах корпуса.

#### 2. Эффективный отвод тепла.

Пассивные методы: радиаторы, тепловые мосты, медные теплопроводящие пластины.

Активные методы: вентиляторы, тепловые трубы, направленный воздушный поток.

#### 3. Расчёт теплового баланса.

Тепловое сопротивление выражается в °С/Вт и рассчитывается как  $\Delta T/P$ . В типовом проекте рассчитываются точки перегрева для 3–5

компонентов. На основании данных из даташитов и тепловых симуляций формируется модель нагрева и рассеивания тепла [1].

*Практические рекомендации по размещению компонентов*

Расположение на плате:

- горизонтальные платы нагреваются сильнее по центру; следует располагать чувствительные компоненты ближе к краям;
- расстояние между силовыми элементами — не менее 5–10 мм;
- компоненты высокой и низкой частоты желательно размещать в разных слоях (если используется многослойная плата) [2].

Экраны и перегородки: перегородки из стали, меди или керамики снижают ИК-излучение. Они также защищают от электромагнитного излучения.

Механическое крепление: использование стоек 5–10 мм даёт дополнительный воздушный зазор. Крепление на алюминиевые основания улучшает отвод тепла.

*Примеры промышленных решений*

1. Модуль управления в нефтегазовой промышленности (до +125 °С)

Особенности компоновки:

- Использование жаропрочных печатных плат на основе полиимидов или полиарилатов (например, polyimide PCB).
- Размещение силовых компонентов (MOSFET, IGBT) на отдельных теплоотводящих подложках (металлокерамика или алюминиевая подложка).
- Разнесение чувствительных аналоговых цепей от источников тепла (силовая часть, трансформаторы).
- Герметичный металлический корпус с тепловыми радиаторами и термостойкими уплотнителями.

2. Автомобильный электронный блок управления (ЭБУ) двигателя (до +150 °С).

Особенности компоновки:

- применение компонентов в исполнении AEC-Q100 Grade 0 (расчёт на +150 °С);
- заливка компаундом с высокой теплопроводностью (например, силиконовые компаунды);
- многослойная печатная плата с тепловыми вентами и термостабильным припоем (например, SnAgCu);
- вынесенный разъём для снижения теплового воздействия со стороны двигателя.

3. Электроника буровой установки (до +200 °С)

Особенности компоновки:

- использование кремний-на-сапфире (SOS) или кремний-карбидных (SiC) компонентов;
- минимизация количества подвижных соединений (пайка вместо разъёмов);
- термоизолированные слои внутри корпуса, разграничивающие "горячие" и "холодные" зоны;
- радиаторные элементы выведены наружу сквозь герметичный корпус.

4. Устройства управления в металлургическом производстве (до +250 °С вблизи печей).

Особенности компоновки:

- компоновка с выносом чувствительной электроники в удалённый модуль, соединённый экранированным кабелем;
- промежуточная буферная зона в корпусе с фазосменными материалами для временной тепловой инерции;
- использование пассивного охлаждения — радиаторы, теплоотводящие пластины, тепловые трубки (heat pipes);
- полностью металлический корпус с керамическими изоляторами.

5. Системы авиационной электроники (до +175 °С)

Особенности компоновки:

- материалы и пайка соответствуют стандартам MIL-STD и DO-160;
- экранирование модулей от теплового излучения (светоотражающие покрытия, изолирующие экраны);
- разделение компоновки на "горячую" и "холодную" часть: силовая — вблизи двигателя, логика — в более защищённой зоне;
- установка температурных сенсоров в критических зонах — для отключения или защиты устройства.

*Используемые материалы корпусов*

Таблица 1 – Сравнение материалов корпусов и их тепловых характеристик

Материал	Теплопроводность (Вт/м·К)	Темп. стойкость	Примечание
Оцинкованная сталь	58	до 400 °С	Дёшево, эффективно
Алюминий	210	до 300 °С	Высокая теплопровод- ность

Медь	390	до 250 °С	Дорогой, но эффективный
Керамика	20–35	до 800 °С	Хрупкая, термостойкая

#### *Технологии охлаждения*

##### *Тепловые трубки (Heat Pipes) и испарительные камеры*

Тепловая трубка — это замкнутая трубка, внутри которой находится специальная жидкость, кипящая при низких температурах. Жидкость испаряется в горячей части трубки, поднимаясь к холодной части, где конденсируется и возвращается в горячую часть. Этот процесс позволяет эффективно передавать тепло с минимальными потерями.

##### Преимущества:

- высокая эффективность передачи тепла (до 1000 Вт/м·К);
- пассивная система охлаждения, не требующая энергии или дополнительных движущихся частей;
- компактность и высокая скорость отвода тепла при малых размерах.

Тепловые трубки активно используются в ноутбуках, серверных системах, промышленной электронике и автомобилях. Например, в графических процессорах и чипсетах тепловые трубки могут выводить тепло от горячих точек, эффективно рассеивая его по большому радиатору.

##### *Жидкостное охлаждение (Liquid Cooling)*

Жидкостное охлаждение использует циркуляцию жидкости, обычно воды или специального теплоносителя, через теплопередающие элементы, которые поглощают тепло от горячих компонентов. Жидкость проходит через радиатор или теплообменник, где тепло передается в окружающую среду, охлаждая компоненты.

##### Преимущества:

- отличная теплопроводимость: жидкость обладает высокой теплоемкостью, что позволяет эффективно рассеивать значительные объемы тепла;
- возможность охлаждения нескольких компонентов одновременно;
- компактность и возможность интеграции с другими системами охлаждения.

Системы жидкостного охлаждения активно используются в серверах, высокопроизводительных вычислительных системах, а также в некоторых моделях игровых ПК, где требуется охлаждение мощных процессоров и видеокарт. В некоторых случаях жидкостные

системы используются в бортовых вычислительных системах для предотвращения перегрева в условиях ограниченного пространства.

#### *Фазовые переходы и капиллярные структуры*

Технология охлаждения с фазовым переходом использует изменение состояния вещества (например, переход из жидкости в пар) для поглощения тепла. В некоторых системах используют капиллярные структуры, которые способствуют эффективному перемещению жидкостей между горячими и холодными зонами через капиллярный эффект.

Преимущества:

- высокая эффективность охлаждения за счет использования большего количества скрытой теплоты испарения;
- компактность и отсутствие движущихся частей, что снижает вероятность поломки и снижает уровень шума;
- способность работать в условиях ограниченного пространства и высокой плотности компонентов.

Такие системы применяются в специализированной военной и аэрокосмической электронике, а также в системах охлаждения в условиях экстремальных температур, где обычные методы охлаждения оказываются недостаточными.

#### *Термоэлектрическое охлаждение (элементы Пельтье)*

Элементы Пельтье (термоэлектрические элементы) используют эффект Пельтье, при котором электрический ток, проходящий через соединение двух различных проводников, вызывает теплообмен (один участок охлаждается, а другой — нагревается). Это позволяет создавать компактные системы, где тепло эффективно перекачивается от горячей к холодной стороне.

Преимущества:

- компактность и возможность интеграции в небольшие устройства;
- возможность точного контроля температуры;
- быстрое охлаждение с низким уровнем шума.

Термоэлектрическое охлаждение используется в персональных устройствах, таких как охлаждающие подставки для ноутбуков, а также в некоторых медицинских и научных приборах, где требуется точный контроль температуры. Однако на практике эффективность таких систем может ограничиваться, когда требуется охлаждение мощных источников тепла.

#### *Наноматериалы и теплопроводящие композиты*

Наноматериалы, такие как графен, углеродные нанотрубки или алмазоподобный углерод, имеют уникальные теплопроводные

свойства. Эти материалы могут использоваться в качестве компонента для радиаторов, термоинтерфейсов и других элементов системы охлаждения. Например, графен обладает теплопроводностью в несколько раз выше, чем медь.

Преимущества:

- существенно повышенная теплопроводность по сравнению с традиционными материалами;
- улучшенные свойства существующих теплопроводных материалов;
- нанокompозиты могут быть интегрированы в мелкие детали, что позволяет создавать более эффективные системы охлаждения.

Такие материалы активно исследуются для применения в электронике нового поколения, включая микросхемы, процессоры и чувствительные датчики, работающие в условиях высоких температур. На практике, они могут использоваться для улучшения характеристик радиаторов, корпусов и термоинтерфейсов.

*Аддитивные технологии в теплоотводящих конструкциях*

Аддитивные технологии (3D-печать) позволяют создавать элементы теплоотведения с оптимизированной геометрией, не ограничиваясь традиционными методами производства. Это дает возможность создавать сложные формы радиаторов, которые могут эффективно рассеивать тепло, а также интегрировать системы охлаждения непосредственно в конструкцию устройства.

Преимущества:

- возможность оптимизации формы радиаторов для повышения эффективности;
- персонализированные решения, которые идеально подходят для конкретных конструкций;
- быстрота прототипирования и возможность быстрого внесения изменений в дизайн.

Аддитивные технологии нашли широкое применение в разработке новых решений для охлаждения в аэрокосмической, автомобильной и военной электронике, а также в некоторых областях производства, где требуется индивидуальный подход к каждой единице оборудования.

*САПР и термомоделирование*

SOLIDWORKS Simulation – это портфель простых в использовании решений для структурного анализа методом конечных элементов (FEA).

Такой анализ позволяет прогнозировать поведение изделия в реальной среде путем виртуального тестирования моделей CAD, а

также производить расчет распределения температуры и теплового потока с помощью термического анализа.[4]

Тепловой анализ печатной платы в Altium Designer позволяет определить, какие меры охлаждения необходимы для удержания температуры в допустимых пределах.

Процесс включает следующие шаги:

1. определение теплового сопротивления компонента. Обычно это значение указано в технической спецификации интегральных микросхем. Чтобы определить рабочую температуру, нужно умножить потребляемую компонентом мощность на его тепловое сопротивление;

2. изучение изменения температуры компонентов. Нужно определить максимально допустимую температуру компонентов на плате и изучить, как она будет меняться в зависимости от рассеиваемой мощности;

3. оценка необходимости дополнительных мер охлаждения. Если температура компонента выходит за допустимые пределы, могут потребоваться, например, радиаторы или вентиляторы.

Некоторые меры по отводу тепла, которые можно применить в Altium Designer:

- добавление тепловых перемычек к заземлённой многоугольной заливке под компонентом;
- использование материала подложки платы с более высокой теплопроводностью;
- установка на компонент радиатора;
- добавление меди под компонентом, например, в виде плоского слоя;
- использование вентилятора для подачи холодного воздуха на корпус компонента;
- крепление платы непосредственно на металлическом корпусе с помощью теплопроводящего материала.

Для проведения теплового анализа в Altium Designer также можно использовать инструмент Altair PollEx. Он позволяет провести базовый анализ целостности сигналов, тепловой анализ, электрическую верификацию и анализ технологичности печатной платы.[5]

ANSYS CFX – один из наиболее точных инструментов для тепловых расчетов в силовой электронике. Кроме расчета конвективного переноса энергии потоком жидкости или газа ANSYS CFX обладает функцией сопряженного теплообмена для расчета теплопереноса в твердых телах. Модуль также содержит широкий набор моделей для расчета теплового излучения в газах, независимо от

того, являются они полупроницаемыми, полностью проницаемыми или непроницаемыми для теплового излучения [6].

*Влияние факторов окружающей среды*

*Влажность*

Механизм воздействия: конденсация влаги на плате → электролитическая коррозия (особенно при наличии гальванических пар, например, медь-алюминий); набухание диэлектриков → изменение ёмкостных характеристик.

Примеры повреждений: разрушение токопроводящих дорожек (рост сопротивления, обрывы), коррозия выводов компонентов (например, в бессвинцовых припоях).

Методы защиты:

1) Конформное покрытие:

- акриловые – дешёвые, но нестойкие к растворителям;
- силиконовые – гибкие, выдерживают  $-55^{\circ}\text{C} \dots +200^{\circ}\text{C}$ ;
- полиуретановые – устойчивы к абразивам.

2) Герметизация компаундами (эпоксидные, силиконовые).

3) Использование гидрофобных материалов (например, наноструктурированные покрытия).

*Пыль*

Проблемы: забивание вентиляционных каналов → перегрев; абразивный износ контактов (например, в разъёмах).

Решения: фильтры с классом защиты IP6X (полная пыленепроницаемость), ламинирование плат (для предотвращения коротких замыканий из-за проводящей пыли).

*Вибрации*

Критические последствия: термоусталость пайки – микротрещины при циклических нагрузках (например, в автомобильной электронике); откручивание крепежа → потеря контакта.

Способы компенсации: виброизоляторы (силиконовые демпферы); гибкие выводы (например, проволочные переключки вместо жестких шин).

Конструктивные решения: укорочение траверс (снижение резонансных колебаний); дублирование критических соединений.

*Химические вещества*

Примеры агрессивных сред: сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) в нефтегазовой отрасли → сульфидирование серебряных контактов; солевой туман (морская электроника) → ускоренная коррозия.

Защита: коррозионностойкие покрытия (никель-золото, палладий); герметичные корпуса из нержавеющей стали.[3]



*Методы тестирования электронных устройств в условиях повышенной температуры*

Тестирование электронных устройств в условиях повышенной температуры является неотъемлемой частью оценки их надежности, долговечности и соответствия требованиям промышленной эксплуатации. Такие испытания позволяют выявить скрытые дефекты, проверить термостойкость материалов, а также оценить устойчивость схемных решений к перегреву.

#### 1. Термостатирование (испытание в термокамере)

Наиболее распространенный метод, при котором устройство помещается в термокамеру с контролируемой температурой (обычно от +85 °С до +150 °С). Измерения электрических параметров проводятся как до, так и во время нагрева, что позволяет оценить влияние температуры на работу устройства.

#### 2. Испытания на тепловой удар (Thermal Shock)

Устройство многократно и быстро переводится из низкотемпературной среды в высокотемпературную (например, из -40 °С в +125 °С), чтобы проверить устойчивость к резким температурным перепадам. Это позволяет выявить дефекты пайки, трещины в корпусах и расслоения в многослойных платах.

#### 3. Высокотемпературный хранищный тест (High Temperature Storage Test, HTST)

Устройство выдерживается при высокой температуре без подачи напряжения в течение длительного времени (до 1000 часов и более). Метод применяется для оценки старения компонентов и деградации материалов.

#### 4. Тест с подачей питания при высокой температуре

На устройство подается напряжение и создается нагрузка в условиях высокой температуры. Такой метод выявляет «слабые» экземпляры, которые выходят из строя на ранних этапах эксплуатации. Часто применяется при массовом производстве для увеличения надежности партии.

#### 5. Инфракрасная термография

Метод используется как дополнение к вышеуказанным испытаниям. С помощью ИК-камер фиксируются зоны локального перегрева на работающем устройстве. Это помогает найти потенциальные неисправности (например, тепловые пробки, повреждения дорожек, повышенное сопротивление контактов).

#### 6. Методы автоматизированного тестирования (АТЕ)

В рамках АТЕ могут быть реализованы температурные профили с программируемыми изменениями температуры, при этом

осуществляется контроль всех электрических параметров в режиме реального времени. Это особенно важно при тестировании сложных микросхем и СБИС.

#### *Заключение*

Компоновка электроники в условиях повышенной температуры требует комплексного подхода – от выбора термостойких материалов до применения современных систем охлаждения и теплового моделирования. Соблюдение этих принципов позволяет обеспечить высокую надёжность и долговечность устройств, используемых в экстремальных условиях. В будущем значительный потенциал для улучшения термоуправления представляют наноматериалы, фазовые технологии и аддитивные методы проектирования корпусов.

### **СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Попов В.В. Тепловые режимы в электронной аппаратуре. – М.: Энергоатомиздат, 2016. – 312 с.
2. Громов В.А., Смирнов П.П. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 2018. – 272 с.
3. Кузнецов А.Ю., Иванов С.А. Методы теплового проектирования печатных плат. – СПб.: Политехника, 2020. – 148 с.
4. SolidWorks Simulation User Guide. Dassault Systèmes.
5. Закарайа Петерсон Полное руководство по тепловому анализу печатных плат 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://resources.altium.com/ru/p/circuit-board-thermal-analysis> (дата обращения: 05.04.2025).
6. ANSYS CFX User's Guide. – ANSYS Inc., 2022.

УДК 004.272.43

#### **БОРИСОВ И.С.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ В НАШЕ ВРЕМЯ**

*Современные вычислительные системы становятся все более сложными и мощными, и многопроцессорные архитектуры занимают в этом процессе ключевое место. С развитием технологий, таких как искусственный интеллект, большие данные и облачные вычисления, необходимость в параллельной обработке информации возросла как никогда.*

Многопроцессорные системы представляют собой вычислительные системы, состоящие из нескольких процессоров, работающих одновременно для выполнения задач. Эти системы могут быть организованы по различным архитектурным принципам, среди которых выделяются:

**Симметричная многопроцессорность (SMP):** Все процессоры имеют равный доступ к общей памяти и ресурсам. Это упрощает программирование, но может приводить к узким местам при высокой нагрузке.

**Ассиметричная многопроцессорность (AMP):** Каждый процессор может иметь свои собственные задачи или ресурсы, что позволяет более гибко управлять загрузкой, но усложняет синхронизацию между процессорами.

**Кластерные системы:** Группы взаимосвязанных компьютеров, работающих как единое целое. Каждое устройство выполняет свои вычисления, а результаты объединяются для достижения общей цели.

#### *Преимущества многопроцессорных систем*

Одним из основных преимуществ многопроцессорных систем является возможность параллельной обработки данных. Это позволяет значительно сократить время выполнения сложных вычислительных задач. Среди прочих преимуществ можно отметить:

**Увеличение производительности:** Многопроцессорные системы способны обрабатывать большие объемы данных благодаря распределению задач между несколькими процессорами. Это особенно важно в задачах, требующих интенсивных вычислений, таких как рендеринг графики или моделирование.

**Эффективное использование ресурсов:** В многопроцессорных системах лучше используется мощность процессоров, так как они могут выполнять задачи одновременно. Это способствует более рациональному использованию электроэнергии и аппаратных средств.

**Масштабируемость:** По мере увеличения потребностей в вычислительных ресурсах можно добавлять новые процессоры и узлы в систему, что позволяет легко масштабировать инфраструктуру.

Несмотря на явные преимущества, многопроцессорные системы также сталкиваются с рядом вызовов:

**Сложность программирования:** Разработка программного обеспечения для многопроцессорных систем требует глубоких знаний и навыков, так как программист должен учитывать вопросы совместной работы и синхронизации между процессорами.

**Проблемы с производительностью:** Не все задачи могут быть эффективно распределены между несколькими процессорами.

Существуют задачи, которые требуют последовательной обработки, что может снизить общую производительность системы.

**Узкие места:** Общая память может стать узким местом, если множество процессоров пытаются одновременно получить к ней доступ. Это может привести к задержкам в выполнении задач.

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие вычислительных технологий, и многопроцессорные системы становятся все более актуальными. Эти системы, объединяющие несколько центральных процессоров (ЦП) для параллельной обработки данных, нашли широкое применение в различных областях деятельности благодаря своей высокоэффективной архитектуре.

**Научные вычисления:** многопроцессорные системы активно используются в научных исследованиях, таких как обработка больших объемов данных, моделирование климатических изменений и химических процессов. Для решения сложных математических задач и симуляций требуется значительная вычислительная мощность, которую обеспечивают многопроцессорные системы. Это позволяет ученым быстрее получать результаты и проводить более сложные эксперименты.

**Обработка мультимедиа:** обработка аудио и видео данных требует значительных вычислительных ресурсов. Многопроцессорные системы позволяют одновременно обрабатывать несколько потоков данных, что существенно ускоряет создание и рендеринг медиа-контента. Это особенно важно в индустрии кино и анимации, где время является критическим фактором.

**Сетевые технологии и облачные вычисления:** многопроцессорные системы идеально подходят для работы в облачных средах, где необходима высокая степень масштабируемости и доступности ресурсов. Такие системы используются для распределенной обработки данных, обеспечения надежности и быстродействия серверов. Они позволяют эффективно управлять большими объемами информации и обеспечивать доступ к ресурсам для множества пользователей одновременно.

**Искусственный интеллект и машинное обучение:** искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (ММ) требуют огромных вычислительных мощностей для обработки и анализа данных, обучения моделей и выполнения сложных алгоритмов. Многопроцессорные системы значительно ускоряют этот процесс, позволяя проводить обучение на больших наборах данных и использовать более сложные модели, что ведет к улучшению качества предсказаний и результатов.

Встраиваемые системы: многопроцессорные системы также активно применяются в встраиваемых системах, используемых в автомобилях, медицинских устройствах и домашних беспроводных системах. Благодаря многопоточности и параллельной обработки можно повысить эффективность работы устройств, улучшить их функциональность и снизить энергопотребление.

#### *Перспективы развития*

Энергетическая эффективность: одним из главных направлений развития является повышение энергетической эффективности. Традиционные однопроцессорные архитектуры часто страдают от низкой эффективности. МПС позволяют распределять нагрузку между несколькими ядрами, что может более эффективно использовать энергию. Разработка новых технологий, таких как динамическое управление энергией и адаптивные системы охлаждения, будет способствовать улучшению показателей энергетической эффективности.

Параллелизм программирования: с увеличением числа ядер в процессорах возрастает необходимость в эффективном параллелизме программ. Языки программирования и инструменты для разработки программного обеспечения должны эволюционировать, чтобы упростить процесс параллельного программирования. Новые модели разработки, такие как асинхронное программирование и использование графических процессоров (GPU) для параллельной обработки, становятся все более актуальными.

Искусственный интеллект и машинное обучение: МПС являются идеальными платформами для задач искусственного интеллекта и машинного обучения. Многопроцессорные системы способны обрабатывать большие объемы данных и выполнять сложные вычисления, необходимые для обучения моделей машинного обучения. Разработка специализированных многопроцессорных архитектур с учетом специфики ИИ может значительно ускорить процесс обработки и снижения затрат.

Новые архитектуры и технологии: рынок многопроцессорных систем наблюдает за появлением новых архитектур, таких как систем-on-chip (SoC) и 3D-структуры. SoC объединяют вычислительные и вспомогательные компоненты на одном чипе, что позволяет сократить размеры и повысить эффективность. 3D-структуры, в свою очередь, позволяют увеличить плотность транзисторов и снизить задержки при передаче данных.

Облачные вычисления и серверные решения: с ростом популярности облачных вычислений возрастает потребность в

мощных многопроцессорных серверах. Облачные платформы могут эффективно распределять ресурсы между многочисленными пользователями и приложениями. Разработка гибридных облаков и новых предложений по инфраструктуре, основанных на МПС, улучшит доступность и производительность вычислений.

Таким образом, многопроцессорные системы в наше время представляют собой важный элемент вычислительных технологий, способствующий развитию различных сфер деятельности. Их преимущества в производительности и возможности параллельной обработки данных делает их незаменимыми для решения современных задач. Однако, чтобы в полной мере использовать потенциал этих систем, необходимо преодолеть существующие вызовы, связанные с программированием и проектированием. В условиях постоянно растущих объемов данных и сложности вычислительных задач.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Андреев А.М. Многопроцессорные вычислительные системы: теоретический анализ, математические модели и применение : учебное пособие / А. М. Андреев, Г. П. Можаров, В. В. Сюзев. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2011. – 332 с..

2. Баканов В.М. Многомашинные комплексы и многопроцессорные системы: учебное пособие. – М.: МГУПИ. Москва, 2014. – 126 с.

3. Каляев А.В. Многопроцессорные вычислительные системы с программируемой архитектурой. – М.: Радио и Связь, 1984. – 240 с.

УДК 004.65

**БОЧАРОВА К.Е.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЖУЩЕГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ С ЧПУ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И ТОЧНОСТЬ**

*Рассматривается анализ влияния скорости режущего движения с использованием лазерной резки с ЧПУ толщиной 3 мм, 4 мм и 5 мм со скоростью резки 1 м/мин, 1,4 м/мин и 2 м/мин на шероховатость и точность.*

Станок с числовым программным управлением (далее – ЧПУ) представляет собой автоматизированную систему с

программируемыми и хранящимися на носителе командами. Станок лазерной резки с ЧПУ объединяет в себе технологию ЧПУ и лазера, резак способен резать листы сложной формы, требующие точности обработки. Станки с ЧПУ имеют два или более направлений движения, называемых осями. Движения по оси включают линейное движение, которое представляет собой прямую линию, или круговое движение. Одной из характеристик, показывающих сложную работу станка с ЧПУ, является его множество осей и комбинация движений по каждой оси. Принцип работы лазерной резки заключается в направлении мощного лазерного луча на разрезаемый материал через компьютер. ЧПУ представляет собой лазерный станок, который использует газ  $O_2$ . Этот газ используется при резке стали.

Машина лазерной резки с ЧПУ PT. PuraBarutama является основным инструментом в этом исследовании. Эта машина используется для резки пластин с использованием технологии лазерной резки в соответствии с указанными изменениями скорости. Программное обеспечение AutoCAD 2010 используется для создания программ проектирования и резки, которые будут использоваться на машинах лазерной резки с ЧПУ. AutoCAD 2010 позволяет выполнять точные и аккуратные проекты и облегчает создание программ резки в соответствии с изменениями скорости 1 м/мин, 1,4 м/мин и 2 м/мин. Использование системы лазерной резки Surcut в качестве управляющего программного обеспечения позволяет устанавливать параметры резки, включая скорость резки, и обеспечивает эффективную и точную работу машины лазерной резки с ЧПУ. Простая конструкция объекта, подлежащего резке, представлена на рисунке 1.

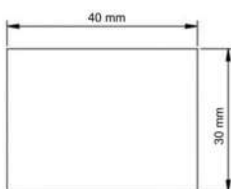


Рисунок 1 – Дизайн изображения для резки

Применение лазерной резки широко и разнообразно, охватывая производство, автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность, ювелирную промышленность и многие другие отрасли. Лазерная резка обеспечивает высокую точность, сложные конструкции и быстрое время производства. Хотя лазерная резка имеет много преимуществ по сравнению с традиционными методами резки, у нее есть ограничения, такие как ограниченная толщина.

Результаты резки лазерными пластинами толщиной 3 мм, 4 мм и 5 мм с использованием различных скоростей резки 1 м/мин, 1,4 м/мин и 2 м/мин при проверке точности с помощью координатно-измерительной машины (далее – КИМ) и шероховатости с помощью прибора для проверки шероховатости поверхности показаны на рисунке 2. Ниже это будет рассмотрено.

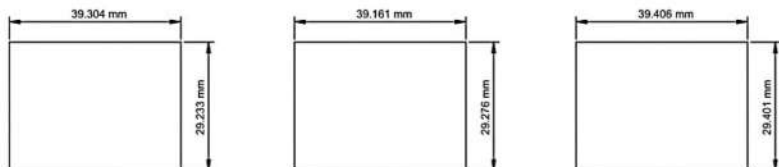


Рисунок 2 – Результаты резки пластины толщиной 3 мм со скоростями 1 м/мин, 1,4 м/мин и 2 м/мин

Рисунок 3 показывает процент точности размеров, достигнутый благодаря лазерной резке. Она показывает, что точность ширины и длины составляет до 98,5%. Тем не менее, было очевидно, что эта машина должна быть более точной, так как погрешности оставались.

Скорость резания (м/мин)	Разница в ширине (мм)	Разница в длине (мм)	Процент широкой точности (%)	Длинный процент точности (%)
1	0,767	0,696	97,44	98,26
1,4	0,724	0,839	97,58	97,91
2	0,599	0,594	98	98,51

Рисунок 3 – Процент точности резов 3 мм

Более ясно, из результатов, наилучшая скорость резки для толщины пластины 3 мм составляет 2 м/мин. Как видно из скорости резки, уменьшение размеров результатов резки является наименьшим. Разница в ширине составляет всего 0,599 мм, а в длине - 0,594 мм, с уровнями точности 98% и 98,51%. Характеристики шероховатости показаны на рисунке 4.

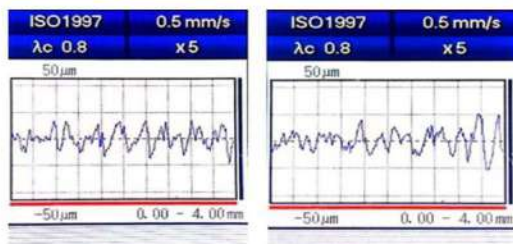


Рисунок 4 – Изображение шероховатости пластины толщиной 3 мм при скорости резания 2 м/мин



Скорость измерена по стандарту ISO 1997; 0,5 мм/с;  $\lambda c=0,8$ ;  $X=5$ ; Гаусс.

Более подробная информация о влиянии скорости перемещения шпинделя на скорость лазерной резки представлена на рисунке 5. Результаты измерений шероховатости поверхности, выраженные в значениях Ra трех образцов объектов резки пластин толщиной 3 мм, показали наивысшее значение Ra 24,719 мкм и наименьшее значение Ra 6,51 мкм.

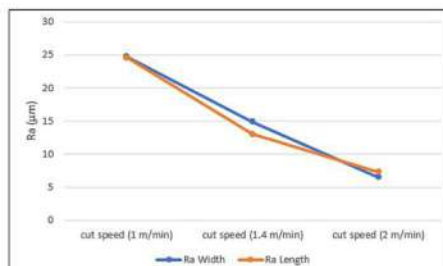


Рисунок 5 – Влияние изменения скорости лазерной резки шпинделя при толщине 3 мм

Более того, анализируя значения Ra, более высокая скорость резки создает более гладкую поверхность, чем более низкая скорость. Далее будут обсуждаться другие толщины материалов, как показано на рисунке 6, который показывает влияние различных скоростей на толщину пластины 4 мм с использованием КИМ для осмысления анализа. Это более наглядно показано на рисунке 7.

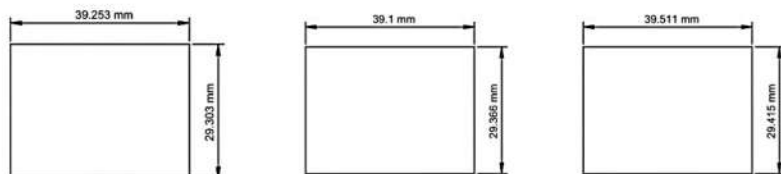


Рисунок 6 – Результаты резки пластины толщиной 4 мм со скоростями 1 м/мин, 1,4 м/мин и 2 м/мин

Скорость резания (м/мин)	Разница в ширине (мм)	Разница в длине (мм)	Процент широкой точности (%)	Длинный процент точности (%)
1	0,697	0,747	97,67	98,13
1,4	0,634	0,9	97,88	97,75
2	0,585	0,489	98,05	98,77

Рисунок 7 – Процент точности резов 4 мм

Из полученных результатов наилучшая скорость резки для толщины пластины 4 мм составляет 2 м/мин. При этой скорости резки уменьшение размеров результатов резки наименьшее. Разница в ширине составляет 0,585 мм, а в длине — 0,489 мм, с уровнями точности 98,05% и 98,77%. На рисунке 8 показана шероховатость, полученная с помощью прибора для измерения шероховатости поверхности. Он обеспечивает более значительный период, чем рисунок 4 прибора для измерения шероховатости поверхности, но не для его частоты.

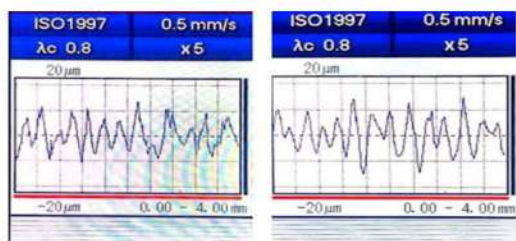


Рисунок 8 – Шероховатость пластины толщиной 4 мм при скорости резания 2 м/мин (измерено по стандарту ISO 1997; 0,5 мм/с;  $\lambda_c=0,8$ ; X=5; Гаусс)

Наконец, для сравнения, есть пластина толщиной 5 мм, вырезанная лазером с различными скоростями, как и предыдущие. Рисунок 9 показывает, что скорость существенно влияет на размеры объекта.

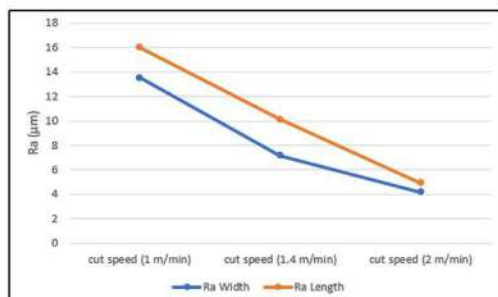


Рисунок 9 – Влияние изменения скорости лазерной резки шпинделя при толщине 4 мм

Кроме того, анализ результатов измерений шероховатости поверхности, указанных в значениях Ra трех образцов объектов резки пластин толщиной 5 мм, показал вариации. Наибольшее значение Ra составило 16,002 мкм, а наименьшее — 4,183 мкм. Чем ниже значение

Ра, тем более гладкой является поверхность объекта. Мера реза в КИМ показана на рисунке 10.

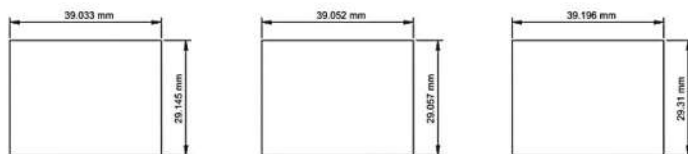


Рисунок 10 – Результаты резки пластины толщиной 5 мм со скоростями 1 м/мин, 1,4 м/мин и 2 м/мин

Из рисунка 11 видно, что чем больше толщина удара, тем значительнее шероховатость, а затем шероховатость меняется на противоположную.

Скорость резания (м/мин)	Разница в ширине (мм)	Разница в длине (мм)	Процент широкой точности (%)	Длинный процент точности (%)
1	0,855	0,967	97,15	97,58
1,4	0,943	0,948	96,86	97,53
2	0,69	0,804	97,7	97,99

Рисунок 11 – Процент точности резов 5 мм

Из полученных результатов наилучшая скорость резки для толщины пластины 5 мм составила 2 м/мин. При этой скорости резки уменьшение размеров результатов резки было наиболее значительным. Разница в ширине составила 0,69 мм, а в длине — 0,804 мм, что является самым высоким показателем по сравнению с предыдущими толщинами 3 и 4 мм, с уровнями точности 97,7% и 97,99%. Рисунок 12 пытается выяснить влияние частоты, и, хотя он почти идентичен, он показывает частоту чаще, чем на рисунке 8.

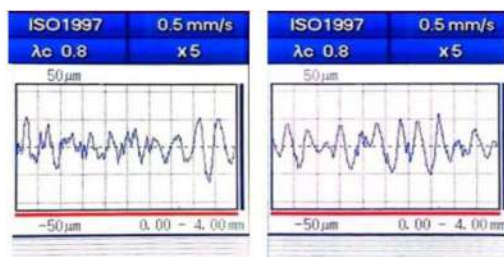


Рисунок 12 – Шероховатость пластины 5 мм при скорости резания 2 м/мин (измерено по стандарту ISO 1997; 0,5 мм/с; λс=0,8; X=5; Гаусс)

Рисунок 13 описывает влияние скорости перемещения шпинделя на график. Он также показывает корреляцию между скоростью резания и шероховатостью в Ra.

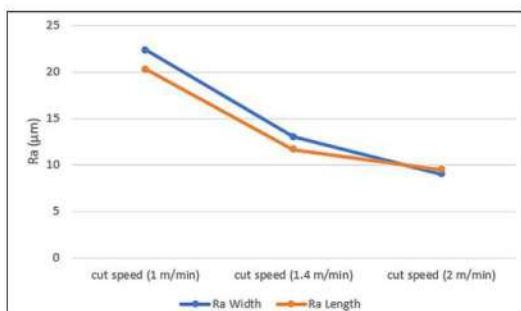


Рисунок 13 – Влияние изменения скорости лазерной резки шпинделя при толщине 5 мм

Данные измерения шероховатости поверхности, выраженные в значениях Ra трех образцов резки пластин толщиной 5 мм, показали вариации. Наибольшее зафиксированное значение составило Ra 22,365 мкм, а наименьшее – Ra 8,995 мкм. Как и предполагалось, чем ниже значение Ra, тем более гладкой является поверхность объекта.

На основе исследований в этом обзоре утверждается, что лазерная резка является точной и эффективной техникой, используемой в различных отраслях промышленности для резки и формовки различных материалов, но ее необходимо исправить. Точнее говоря, доказательства, обнаруженные в частоте тестером шероховатости поверхности, более ощутимы, чем ее период, согласно следующим доказательствам:

Вкратце, из полученных результатов, наилучшая скорость резки для всех составила 2 м/мин для толщины пластины 3 мм с разницей в ширине 0,599 мм и длине 0,594 мм, с уровнями точности 98% и 98,51%, а шероховатость показала самое высокое значение Ra 24,719 мкм и самое низкое Ra 6,51 мкм. При толщине пластины 4 мм разница в ширине составила 0,585 мм, а в длине 0,489 мм, с уровнями точности 98,05% и 98,77%. Самое высокое значение шероховатости Ra составило 16,002 мкм, а самое низкое – 4,183 мкм. Для толщины пластины 5 мм разница была между 0,69 мм по ширине и 0,804 мм по длине, с уровнями точности 97,7% и 97,99%. Наибольшее значение шероховатости составило Ra 22,365 мкм, наименьшее — Ra 8,995 мкм.

Если материал был толще, вероятность образования шероховатости поверхности была выше при различных скоростях резания.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Скрипченко В.И., Скрипченко А.И., Григорьев С.В. Принципы создания и развития лазерных обрабатывающих систем в машиностроении // Вестник машиностроения. – 1988. – N 10.

2. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Лазерная техника и технологии // Кн.2. Инженерные основы создания технологических лазеров. –М.:Высшая школа.1988. – 176 с.

УДК 621.317.7

**БУКИНА Ю.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВЫХ ЧАСТОТОМЕРОВ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ И ПЛИС**

*Статья посвящена анализу алгоритмов измерения частоты сигналов в условиях помех. Рассматриваются методы прямого счёта, совпадения и интервалов, а также роль ЦОС и стабильности опорных генераторов.*

Современные технологии, такие как телекоммуникации, научные эксперименты и промышленная автоматизация, требуют высокоточного измерения частоты сигналов. Точность частотомеров напрямую влияет на качество передачи данных, надёжность научных результатов и эффективность автоматизированных систем. Однако традиционные методы измерения сталкиваются с ограничениями, вызванными дискретизацией сигналов, шумами и нестабильностью опорных генераторов. В этой связи актуальной задачей становится разработка цифровых частотомеров на базе микроконтроллеров и программируемых логических интегральных схем ПЛИС, которые сочетают гибкость программирования с высокой производительностью.

Микроконтроллеры обеспечивают удобство реализации алгоритмов и управление периферией, а ПЛИС позволяют обрабатывать сигналы в реальном времени благодаря параллельной архитектуре. Однако для достижения максимальной точности необходимо комплексное решение, включающее оптимизацию

алгоритмов измерения, повышение стабильности опорных генераторов и применение методов цифровой обработки сигналов ЦОС. В данной статье анализируются ключевые подходы к улучшению точности цифровых частотомеров: сравниваются методы прямого счёта, совпадения и интервалов, рассматривается влияние стабильности опорных частот, а также демонстрируется роль ЦОС в снижении погрешностей. Результаты работы могут быть использованы при проектировании измерительных систем для задач, где критична точность определения частоты в условиях помех и не идеальности компонентов.

### 1.1 Анализ алгоритмов измерения частоты.

Метод прямого счёта является базовым подходом для измерения частоты сигнала. Его суть заключается в подсчёте количества импульсов входного сигнала  $N$  за фиксированный временной интервал  $T$ , задаваемый опорным генератором. Частота сигнала  $f$  вычисляется по формуле:

$$f = \frac{N}{T},$$

где  $N$  — количество зарегистрированных импульсов;  $T$  — длительность измерительного интервала.

Принцип работы:

Сигнал подаётся на вход счётчика микроконтроллера или ПЛИС. Опорный генератор формирует временное окно  $T$ , в течение которого счётчик фиксирует импульсы. По окончании интервала  $T$  значение счётчика  $N$  считывается, и частота рассчитывается по формуле.

Преимущества метода:

- Простота реализации на микроконтроллерах с использованием встроенных таймеров.

- Низкие вычислительные затраты.

Недостатки и погрешности:

погрешность возникает из-за несовпадения фронтов входного сигнала и начала или конца интервала  $T$  (дискретизация времени).

Максимальная абсолютная погрешность составляет:

$$\Delta f = \pm \frac{1}{T}$$

Например, при  $T = 1$  с, погрешность  $\Delta f = \pm 1$  Гц.

Ограничение по частоте: максимальная измеряемая частота зависит от быстродействия счётчика. Для микроконтроллеров типичный предел — до нескольких МГц.

Зависимость точности от  $T$ : увеличение  $T$  снижает погрешность, но требует большего времени измерения.

Пример:

Для сигнала  $f = 10$  кГц и  $T = 0.1$ с:

$$N = f \cdot T = 1000 \text{ импульсов}, \Delta f = \pm 10 \text{ Гц}$$

Реализация на микроконтроллерах:

Используются таймеры в режиме счётчика импульсов.

Для высокочастотных сигналов применяют делители частоты.

Метод прямого счёта эффективен для низких и среднечастотных сигналов, но его точность ограничена при работе с короткими интервалами  $T$  или в условиях шумов. Для повышения разрешающей способности часто комбинируют с другими методами, такими как интерполяция или усреднение [4].

### 1.2. Метод совпадения.

Метод совпадения основан на измерении времени, через которое совпадают фронты входного сигнала и опорного генератора. Этот подход позволяет достичь высокой точности за счёт анализа относительного сдвига между двумя сигналами с близкими частотами.

Суть метода:

Пусть опорный генератор имеет частоту  $f_{ген.}$ , а входной сигнал —  $f_{вх.}$ .

Если  $f_{ген.} \neq f_{вх.}$ , фронты сигналов постепенно смещаются относительно друг друга.

Время до совпадения фронтов  $T$  связано с разностью частот:

$$T = \frac{T_{ген.} \cdot T_{вх.}}{|T_{ген.} - T_{вх.}|},$$

где  $T = \frac{1}{f_{ген.}}$ ,  $T = \frac{1}{f_{вх.}}$  — периоды опорного и входного сигналов.

Частота входного сигнала вычисляется как:

$$f_{вх.} = f_{ген.} \cdot \left( 1 \pm \frac{T_{ген.}}{T} \right)$$

Принцип работы:

Два сигнала входной и опорный подаются на схему сравнения в ПЛИС. Логика ПЛИС фиксирует моменты совпадения их фронтов, например, по восходящему или нисходящему фронту. Измеряется интервал  $T$ , за который происходит полное совпадение. На основе  $T$  и известной  $f_{ген.}$  рассчитывается  $f_{вх.}$ .

Преимущества метода:

- Высокая разрешающая способность: погрешность может быть снижена до долей герца за счёт увеличения  $T$ .
- Эффективность на высоких частотах: подходит для сигналов в диапазоне МГц–ГГц, где метод прямого счёта неприменим.
- Минимизация шумов: использование стробирования по фронтам снижает влияние случайных помех.

Недостатки:

Требование стабильности опорного генератора: дрейф  $f_{ген}$  напрямую влияет на точность.

Сложность реализации: требует точной синхронизации и быстрой обработки данных.

Ограничение по диапазону: разность  $|f_{вх} - f_{ген}|$  должна быть мала для разумного времени измерения.

Пример: при значениях  $f_{ген} = 10$  МГц,  $f_{вх} = 10.001$  МГц

$$T = \frac{0,1\text{мкс} \cdot 0,09999\text{мкс}}{0,00001\text{мкс}} \approx 1\text{мс}$$

Относительная погрешность при измерении  $T$  с разрешением 1 нс:  $\Delta f_{вх} \approx \pm 0,01$  Гц.

Применение в ПЛИС:

- Быстрая логика ПЛИС позволяет детектировать совпадения фронтов с точностью до пикосекунд.
- Реализуются параллельные каналы для одновременного анализа нескольких сигналов.
- Используются встроенные счётчики и компараторы для минимизации задержек.

Снижение погрешности: увеличение  $T$  повышает разрешение, но требует больше времени.

Калибровка опорного генератора и подавление джиттера через ЦОС алгоритмы.

Метод совпадения особенно эффективен в сочетании с ПЛИС, где параллельная обработка и высокая скорость работы логических элементов обеспечивают прецизионные измерения. Он широко применяется в телекоммуникационном оборудовании и метрологических системах.

### 1.3. Метод интервалов

Метод интервалов предназначен для измерения длительности периода входного сигнала с использованием высокочастотного опорного генератора. Этот подход обеспечивает высокую точность, особенно для низкочастотных сигналов, за счёт прямого измерения времени между фронтами сигнала.



Суть метода:

Зафиксировать время между двумя соседними фронтами входного сигнала, например, от восходящего до следующего восходящего фронта.

Измерение длительности периода  $T_{вх.}$  выполняется путём подсчёта импульсов опорного генератора с частотой ген.

Частота входного сигнала вычисляется как:

$$f_{вх.} = \frac{1}{T_{вх.}} = \frac{f_{ген}}{N}$$

где  $N$  — количество импульсов опорного генератора за период  $T_{вх.}$

Принцип работы:

Входной сигнал подаётся на схему детектирования фронтов, например, триггер Шмитта. При обнаружении фронта запускается счётчик, который фиксирует число импульсов  $N$  от опорного генератора до следующего фронта. Длительность периода  $T_{вх.}$  рассчитывается:

$$T_{вх.} = N \cdot T_{ген} = \frac{N}{f_{ген}}$$

Частота  $f_{вх.}$  определяется обратно пропорционально  $T_{вх.}$

Преимущества метода:

- Высокая точность для низких частот: погрешность зависит от стабильности  $f_{ген.}$ . Например, при  $f_{ген.} = 100$  МГц:

$$\Delta T_{вх.} = \pm \frac{1}{f_{ген}} = \pm 10 \text{ нс.}$$

- Независимость от времени измерения: результат получается за один период сигнала.

- Эффективность в условиях шумов: фильтрация ложных срабатываний через гистерезис триггера.

Недостатки:

Ограничение на высокие частоты: Максимальная  $f_{вх.}$  определяется быстродействием счётчика. Например, при  $f_{ген.} = 100$  МГц, максимальная  $f_{вх.} \approx 10$  МГц.

Чувствительность к джиттеру: колебания периода входного сигнала увеличивают погрешность.

Пример: для сигнала с периодом  $T_{вх.} = 1$  мс и  $f_{ген.} = 10$  МГц:

$$N = T_{вх.} \cdot f_{ген} = 10000, \quad f = \frac{10^7}{10^4} = 1 \text{ кГц.}$$

Погрешность измерения:  $\Delta f_{вх.} = \pm \frac{f_{ген}}{N^2} = \pm 0,1 \text{ Гц.}$

Роль ПЛИС в реализации:

- Параллельная обработка: одновременный запуск нескольких счётчиков для разных каналов.
- Регистрация фронтов с пикосекундной точностью: Использование встроенных DLL (Delay-Locked Loops) или PLL (Phase-Locked Loops).
- Буферизация данных: FIFO память для временного хранения результатов счёта.

Сравнение эффективности методов представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов

Параметр	Метод прямого счёта	Метод совпадения	Метод интервалов
Точность	Низкая (зависит от T)	Высокая (доли Гц)	Высокая (зависит от $f_{ген.}$ )
Время измерения	Длительное (секунды)	Среднее (мс-с)	Короткое (один период)
Сложность реализации	Низкая	Высокая	Средняя
Частотный диапазон	До 1-10 МГц	До ГГц	До 10-100 МГц

Метод интервалов оптимален для точного измерения низкочастотных сигналов с минимальным временем анализа. Его реализация на ПЛИС позволяет достичь высокой разрешающей способности за счёт параллелизма и быстрой обработки данных. Однако для высокочастотных приложений предпочтительнее метод совпадения или гибридные алгоритмы [1].

Влияние стабильности опорного генератора на точность измерений.

Стабильность опорного генератора — ключевой фактор, определяющий точность цифрового частотомера. Даже незначительные отклонения его частоты приводят к накоплению ошибки в измерениях. Основные источники погрешности можно разделить на три категории:

1. Температурный дрейф – это изменение электрических параметров электронного устройства или прибора, вызванное изменением внешней температуры среды. Температурный дрейф доминирует в краткосрочных измерениях.

2. Старение компонентов. Со временем параметры кварца и электронных компонентов деградируют, что вызывает долгосрочный

дрейф частоты. Старение критично для систем, работающих годами без калибровки.

3. Внешние помехи. Электромагнитные наводки, вибрации и изменения напряжения питания вносят случайные отклонения (джиттер) и фазовый шум. Внешние помехи вносят случайную погрешность, которая может маскировать полезный сигнал.

Для минимизации погрешностей, вызванных нестабильностью опорного генератора, применяются следующие методы: использование термостабилизированных кварцевых генераторов; калибровка опорной частоты с помощью внешних эталонов (рисунок 1); алгоритмы компенсации дрейфа в микроконтроллерах.

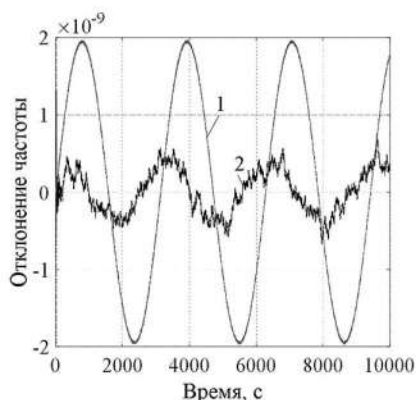


Рисунок 1 – Относительное отклонение частоты опорного генератора при термостабилизации с калибровкой: 1 – без корректировки; 2 – с корректировкой[2]

Цифровые фильтры играют ключевую роль в подавлении шумов и помех, искажающих входной сигнал частотомера. Наиболее распространённые типы – КИХ (конечная импульсная характеристика) и БИХ (бесконечная импульсная характеристика) фильтры.

Таблица 2 – Сравнение КИХ и БИХ [3]

Параметр	КИХ	БИХ
Стабильность	Всегда стабилен	Может быть неустойчивым
Фаза	Линейная	Нелинейная
Ресурсы	Высокие	Низкие
Применение	Подавление ВЧ-шумов, коррекция АЧХ	Рекурсивная фильтрация

КИХ-фильтры идеальны для задач с требованием линейной фазы (например, измерительные системы).

БИХ-фильтры эффективны при ограниченных ресурсах ПЛИС.

Реализация на ПЛИС обеспечивает скорость и точность, необходимые для частотомеров в условиях помех [5].

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ткаченко И.Н. Методы повышения стабильности кварцевых генераторов в прецизионных системах Электронные компоненты. – 2023. – № 4. – С. 45-51.

2. Горбунов Д.А., Тихонов В.С. Гибридный алгоритм измерения частоты на базе ПЛИС Микропроцессорные системы. – 2020. – № 12. – С. 33-39.

3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2020. – 768 с.

4. Марков-Смыслов К.Г. Микропроцессорные измерительные системы. – М.: Энергоатомиздат, 2021. – 512 с.

5. Каган Б.М., Капустян Ю.М. Цифровые измерительные устройства. – М.: Высшая школа, 2017. – 456 с.

УДК 004.514.6

**БУРЦЕВА С.Н., САПРЫКИН А.Н.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ГРАФИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

*В статье рассматривается идея разработки программного модуля на языке C++ для визуализации телеметрической информации, хранящейся в разных форматах.*

В современном мире наблюдается стремительный рост объемов данных, поступающих из различных источников, что создает необходимость в создании эффективных методов их обработки и визуализации. Одним из важных видов таких данных является телеметрическая информация, которая играет значимую роль в мониторинге состояния и характеристик объектов, устройств и систем. Телеметрические данные имеют ряд уникальных свойств, которые делают их незаменимыми в ряде областей:

1) Автоматизированный сбор данных: телеметрические системы обеспечивают автоматизированный процесс сбора данных, что

минимизирует участие человека и снижает вероятность возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором.

2) Передача данных на расстояние: одна из основных функций телеметрии заключается в передаче данных на значительное расстояние между объектом и пунктом контроля. Это позволяет осуществлять мониторинг даже тех объектов, которые находятся вдали от наблюдателя.

3) Реальное время: телеметрические данные поступают в режиме реального времени, что обеспечивает оперативность получения информации и позволяет своевременно реагировать на любые изменения в состоянии контролируемого объекта.

4) Многофункциональность: телеметрия широко применяется в различных отраслях, включая космос, медицину, транспорт, энергетику и многое другое. Благодаря этому она охватывает разнообразные аспекты жизнедеятельности и промышленности.

Для успешного использования телеметрической информации необходимы специализированные инструменты для ее анализа и интерпретации. Неправильное понимание данных может привести к серьезным последствиям, таким как принятие неверных решений, что негативно сказывается на безопасности и эффективности работы систем. Современные условия диктуют необходимость разработки эффективных инструментов, которые будут соответствовать современным требованиям пользователей и позволят быстро и точно интерпретировать большие объемы данных.

Одной из актуальных проблем является недостаточная гибкость существующих инструментов в отношении поддержки различных форматов данных. Часто эти инструменты требуют значительных ресурсов для интеграции новых типов данных или вообще не могут корректно обработать некоторые из них. Ручная обработка данных также остается сложной задачей, особенно в случае больших объемов информации, где человеческий фактор может стать причиной ошибок. В результате отсутствие качественных инструментов визуализации усложняет извлечение полезной информации из сложных наборов данных.

Учитывая эти проблемы, становится очевидной необходимость создания инновационных решений, которые смогут эффективно справляться с обработкой телеметрической информации. Такие инструменты должны поддерживать большое количество форматов данных, обеспечивать удобную визуализацию и упростить процессы анализа, чтобы пользователи могли получать точные и полезные выводы из данных.

### *Постановка задачи*

На начальной стадии разработки модуля применяется высокоуровневый язык программирования C++, а среда разработки QtCreator была выбрана как основной инструмент для реализации проекта. Этот выбор обоснован несколькими важными факторами. Во-первых, QtCreator предоставляет разработчикам мощные возможности для создания кроссплатформенных приложений, которые могут успешно запускаться на различных операционных системах, таких как Windows, macOS и Linux, с минимальными изменениями в исходном коде. Это означает, что разработанные программы могут быть использованы в широком спектре сценариев и условий эксплуатации, что значительно расширяет потенциальную аудиторию и сферу применения создаваемого модуля.

Во-вторых, фреймворк Qt обладает богатым набором библиотек и инструментов, позволяющих эффективно разрабатывать сложные графически пользовательские интерфейсы (GUI). Инструменты для работы с графикой и анимациями в Qt позволяют создать визуально привлекательные и функциональные интерфейсы, что крайне важно для конечных пользователей, которым предстоит ежедневно взаимодействовать с данным модулем. Более того, использование Qt помогает упростить разработку интерфейсов, делая их одновременно интуитивно понятными и функциональными.

Одним из ключевых аспектов разрабатываемого модуля является создание динамически загружаемых библиотек (DLL), которые играют важную роль в обеспечении совместимости с различными форматами входных файлов. Это даёт возможность пользователю работать с самыми разными источниками данных, будь то стандартные форматы файлов или специфичные для конкретных отраслей промышленности. Такая многофункциональность делает модуль пригодным для широкого круга задач, от анализа данных в авиационной сфере до медицинских исследований и промышленных процессов.

Модуль содержит целый арсенал инструментов для работы с графиками, что позволяет пользователям гибко настраивать параметры отображения данных в соответствии с их индивидуальными требованиями. Пользователь сможет выбирать нужные настройки, изменять масштабирование, устанавливать фильтры и т.п., чтобы получить именно ту картину, которая наилучшим образом отражает исследуемые данные. Такой подход повышает удобство работы с модулем и способствует более глубокому пониманию анализируемых данных.

Кроме того, разрабатываемый интерфейс будет выполнен с учётом требований максимальной простоты и интуитивности. Основная цель заключается в том, чтобы любой пользователь, независимо от уровня своей подготовки, мог легко освоить работу с системой и настроить необходимые параметры визуализации. Удобство взаимодействия с модулем значительно сокращает время, необходимое для освоения нового функционала, и увеличивает продуктивность работы.

Таким образом, уникальность данного модуля заключается в его мультиформатной поддержке и высокой степени адаптивности. Он способен интегрироваться в самые разные отрасли, от авиации до здравоохранения, предлагая каждому пользователю индивидуальные решения под его нужды. Разработка такого модуля направлена на увеличение эффективности анализа телеметрических данных, улучшение процесса принятия решений на основе полученных данных, а также на обеспечение гибкости и адаптивности решения для любых сфер деятельности.

Создание этого модуля позволит существенно снизить временные и ресурсные затраты на обработку и анализ данных, повысить точность и надёжность результатов благодаря применению передовых алгоритмов и механизмов обработки информации. Всё это создаёт предпосылки для повышения общей эффективности работы с телеметрическими данными и расширения возможностей их применения в различных сферах деятельности.

#### *Разработка программного обеспечения. Текстовый формат*

При разработке модуля выявлена оптимальная структура программы:

- 1) основной проект;
- 2) проекты реализующие динамические загружаемые библиотеки для различных форматов обработки данных.

Структура проекта продемонстрирована на рисунке 1.

В основном проекте находится класс интерфейс FileHandler от которого наследуются классы, реализующие различные форматы обработки данных, в данном случае FormatTxtPlugin. Такие классы образуют динамически загружаемые библиотеки. Структура программы предполагает расширение путём добавления DLL-файлов, добавляющие поддержку формата данных, таких как текстовый формат. В файле в первом столбце представлено время, а во втором – телеметрическое значение.

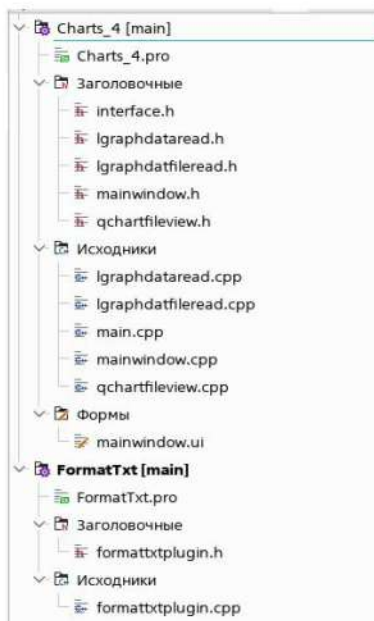


Рисунок 1 – Структура проекта

Данный формат представлен на рисунке 2.

test_E-502_5T771263.txt	
1	xTChart
2	0 2.79507
3	1e-05 2.79188
4	2e-05 2.79268
5	3e-05 2.79387
6	4e-05 2.79427
7	5e-05 2.79348
8	6e-05 2.79348
9	7e-05 2.79387
10	8e-05 2.79547
11	9e-05 2.79547
12	0.0001 2.79627
13	0.00011 2.79547
14	0.00012 2.79627
15	0.00013 2.79587
16	0.00014 2.79627
17	0.00015 2.79747
18	0.00016 2.79747
19	0.00017 2.79787
20	0.00018 2.79827
21	0.00019 2.79787
22	0.0002 2.79787
23	0.00021 2.79787
24	0.00022 2.79827
25	0.00023 2.79867
26	0.00024 2.79907
27	0.00025 2.79867
28	0.00026 2.79867
29	0.00027 2.80026

Рисунок 2 – Содержание файла с данными в текстовом формате



Данные для этого файла были собраны с помощью реального оборудования АЦПЕ-502 путём замера сигналов в программе LGRAPH2. Они были получены в бинарном виде (формат dat), после чего конвертированы в текстовый формат.

Исходные данные конвертированы с помощью класса FormatTxtPlugin в текстовое представление, состоящее из записей срезов значений сигнала в момент времени.

Из полученного текстового файла можно получить график, используя одну из стандартных библиотек Qt–QtCharts. Библиотека QChart — это мощный компонент, предоставляемый фреймворком Qt, предназначенный для создания интерактивных диаграмм и графиков различного типа. Она входит в состав модуля QtCharts, который является неотъемлемой частью экосистемы Qt и предназначен для визуализации данных в приложениях.

Визуализация текстового формата данных в программе представлена на рисунке 3.

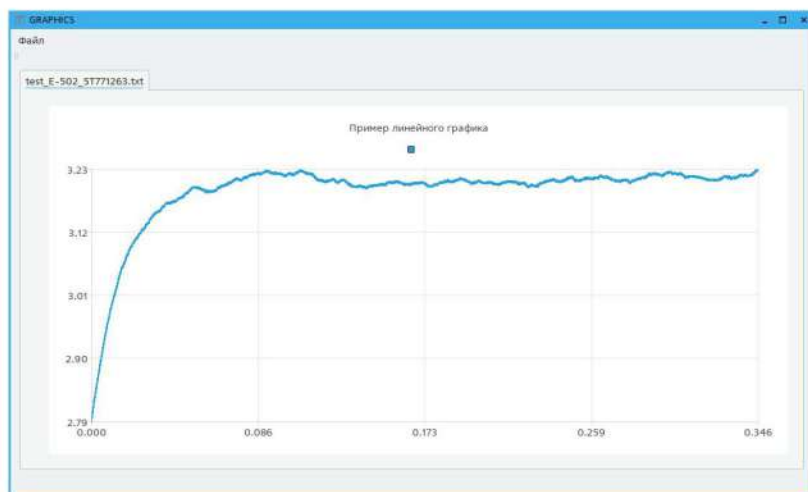


Рисунок 3 – График полученный из текстового файла

#### *Визуализация данных из бинарного формата*

На данном этапе в качестве одного из форматов выбран бинарный формат измерительного модуля АЦП/ЦАП E-502 LCARD. Измерительный модуль АЦП/ЦАП E-502 LCARD представляет собой высокопроизводительное устройство, предназначенное для преобразования аналоговых сигналов в цифровые и наоборот. Данный модуль разработан компанией L-CARD, специализирующейся на производстве оборудования для

автоматизации технологических процессов и научных исследований. Основное назначение E-502 — выполнение высокоточных измерений и управление устройствами в системах автоматического управления и сбора данных.

В документации на данный АЦП была приведена структура вспомогательного бинарного файла с расширением `rag`, в котором хранится информация о измеряемых сигналах. Данная структура приведена на рисунке 4.

```
#pragma pack(1)
struct PARS_OF_WRITE_FILE
{
    char Code[20]; // 20 байт - "35710990,7859525 "
    char PlatName[17]; // 17 байт - название платы
    char TimeString[26]; // 26 байт - число и время завершения ввода данных
    uint16_t ChannelsMax; // 2 байта - общее число каналов для выбранной платы
    uint16_t RealChannelsQuantity; // 2 байта - число введенных (активных) каналов
    int RealKadrsQuantity; // 4 байта - устаревший параметр
    int RealSamplesQuantity; // 4 байта - устаревший параметр
    double TotalTime; // 8 байта - время ввода в секундах в формате 'DOUBLE'
    float AdcRate; // 4 байта - частота АЦП в кГц в формате 'FLOAT'
    float InterkadrDelay; // 4 байта - межкадровая задержка в мс
    // в формате 'FLOAT'
    float ChannelRate; // 4 байта - частота сбора данных с одного канала в кГц
    // в формате 'FLOAT'
    bool ActiveAdcChannelArray[32]; // 1байт*32 - массив, каждый элемент которого
    // равен нулю или единице, единичное значение
    // соответствует тому, что данный вход активен
    uint8_t AdcChannelArray[32]; // 1байт*32 - массив, каждый элемент которого
    // равен номеру канала АЦП для соответствующего входа
    uint8_t AdcGainArray[32]; // 1байт*32 - массив, каждый элемент которого
    // равен индексу коэффициенту усиления (8,1,2 или 3)
    uint8_t IsSignalArray[32]; // 1байт*32 - массив, каждый элемент которого
    // равен нулю или единице, единичное значение
    // соответствует тому, что данный канал
    // был заземлен на плате
    int DataFormat; // 4 байта - формат данных, равен 3
    long long RealKadrs64; // 8 байт, число собранных кадров в 8-байтном формате
    double AdcOffset[32]; // 8 байт, коэффициенты смещения для подключенной
    // платы АЦП (считываются из Flash памяти АЦП)
    double AdcScale[32]; // 8 байт, коэффициенты масштаба для подключенной
    // платы АЦП (считываются из Flash памяти АЦП)
    double CalibrScale[1024]; // 8 байт, пользовательские коэффициенты масштаба
    double CalibrOffset[1024]; // 8 байт, пользовательские коэффициенты смещения
    int Segments; // число сегментов файла данных
};
#pragma pack()
```

Рисунок 4 – Структура `rag` файла

В программе имеется возможность открыть несколько бинарных файлов с расширением `dat`, которые были сохранены программой LGRAPH при замере сигналов. Для этого указывается папка, где они были сохранены и выбираем в левой панели нужные файлы с помощью левой кнопки мыши и клавиши SHIFT/CTRL.

Далее при нажатии на кнопку “Построить график” на правой панели отобразится график, визуализирующий данные в выбранных `dat` файлах. Программа учитывает в файлах присутствие нескольких

замеряемых каналов и отображает их различными цветами на графике (рисунок 5).

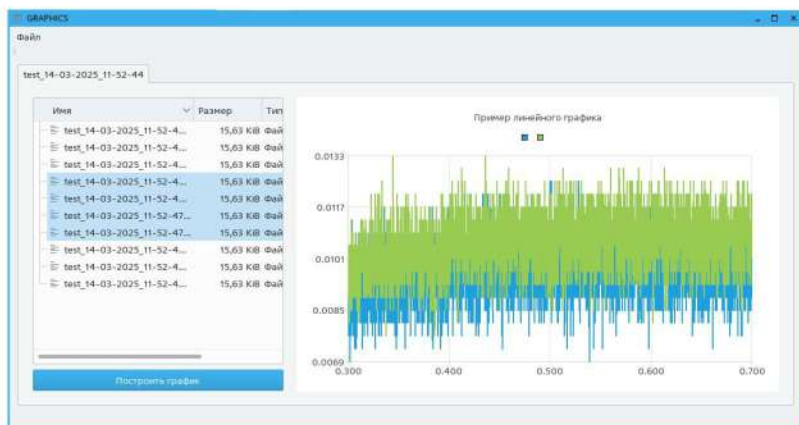


Рисунок 5 – График телеметрии с нескольких каналов

В заключение, разработанный модуль обладает высокой гибкостью и расширяемостью благодаря использованию кроссплатформенного фреймворка Qt и динамически загружаемых библиотек, что позволяет эффективно работать с различными форматами телеметрических данных. Реализованные инструменты визуализации и анализа, основанные на мощных компонентах QtCharts, обеспечивают интуитивное взаимодействие пользователя с данными, повышая точность и оперативность принятия решений. Многоуровневая структура проекта и возможность добавления новых форматов данных делают этот модуль универсальным решением для широкого спектра отраслей и задач. Внедрение таких технологий способствует снижению временных затрат и человеческого фактора при обработке больших объемов телеметрической информации, что существенно повышает эффективность систем мониторинга и диагностики.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бьярне Страуструп Программирование: принципы и практика использования C++. М.: Вильямс, 2019. – 1328 с.
2. Эндрю Кёниг, Барбара Э. Му Эффективное программирование на C++. М.: Вильямс, 2019. – 368 с.
3. Шлее М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 1072 с
4. Модуль E-502© Copyright 2014-2021, ООО “Л Кард”.

УДК 621.396.6

**ГВОЗДКОВ А.А.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ НАРУЖНОГО  
ПРИМЕНЕНИЯ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И  
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ**

*В статье представлен комплексный анализ проблем эксплуатации широкополосных генераторов в условиях наружного применения. Рассмотрены основные факторы, влияющие на работоспособность оборудования: климатические воздействия, электромагнитные помехи, требования по энергоэффективности. Предложены технические решения, включающие усовершенствованные системы терморегулирования, многоуровневую защиту от помех и оптимизированные схемы питания. Приведены результаты натурных испытаний, подтверждающие повышение надежности и срока службы оборудования на 25-30%. Особое внимание уделено экономической эффективности предлагаемых решений.*

Современные информационные, телекоммуникационные и радиолокационные системы всё чаще предполагают размещение активного радиоэлектронного оборудования за пределами защищённых помещений. Одним из наиболее уязвимых компонентов таких комплексов становятся широкополосные генераторы, обеспечивающие стабильное формирование сигнала в заданном частотном диапазоне.

При переходе от лабораторных условий к эксплуатации в реальной внешней среде оборудование подвергается воздействию множества дестабилизирующих факторов: резких температурных колебаний, атмосферной влаги, агрессивных примесей в воздухе, механических нагрузок и сильных электромагнитных полей. Совокупное влияние этих факторов может не только снижать качество сигнала, но и значительно сокращать срок службы устройства.

В условиях растущей нагрузки на сети связи и увеличения количества базовых станций, особенно в формате 5G и IoT-инфраструктуры, устойчивость генераторов к внешним условиям приобретает стратегическое значение.

*Актуальные проблемы эксплуатации ШППГ на открытом воздухе*

Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на эксплуатацию ШППГ, является климат. Оборудование, предназначенное для наружного применения, должно быть рассчитано на работу в экстремальных температурных диапазонах. Например, в северных

регионах температура может опускаться до  $-50^{\circ}\text{C}$ , а в жарких южных пустынных районах температура может достигать  $+50^{\circ}\text{C}$ . В таких условиях материалы корпуса и внутренних компонентов генераторов подвержены значительным температурным колебаниям, что приводит к расширению и сжатию, а значит – к деформации и разрушению.

Особое внимание стоит уделить влажности. В условиях высокой влажности, особенно в сочетании с температурными колебаниями, существует реальный риск образования конденсата внутри корпуса оборудования. Это, в свою очередь, может вызвать коррозию элементов (рисунок 1), а также снизить изоляционные свойства материалов. Механизмы, подверженные коррозии, приводят к электрическим коротким замыканиям, деградации контактов и выходу из строя всего устройства.

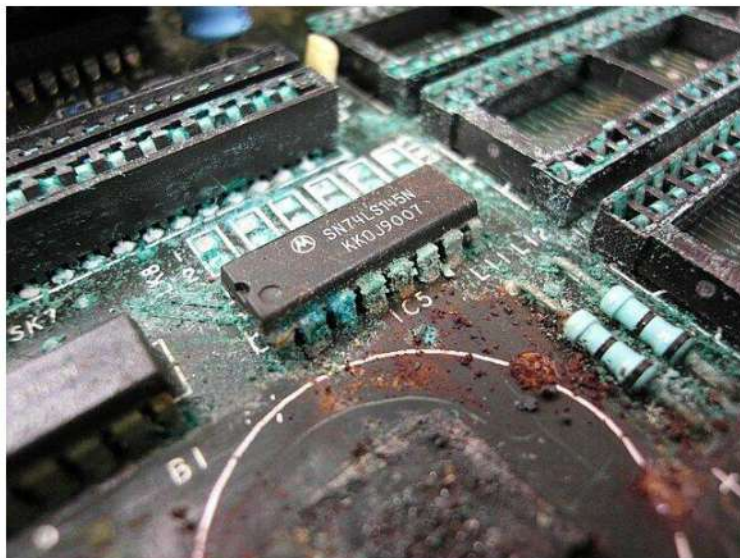


Рисунок 1 – Коррозия элементов

Загрязнённость атмосферы также оказывает серьёзное влияние на долговечность и работоспособность ШПГ. В регионах, расположенных рядом с морем, большое количество соли в воздухе значительно ускоряет процесс коррозии. В крупных промышленных зонах или в городах с высоким уровнем загрязнения воздуха (серы, пыль и химические выбросы) внешние компоненты устройства подвергаются постоянным химическим воздействиям, которые могут разрушать покрытия и ухудшать проводимость.

Атмосферные загрязнители, такие как соли, кислоты, сернистые соединения, способствуют быстрому разрушению корпуса устройства, снижая его защитные свойства. Ранее использование стандартных материалов для защиты от коррозии не обеспечивало должного результата, особенно в экстремальных условиях.

В современных городах электромагнитные помехи стали нормой. Источниками этих помех являются мобильные телефоны, базовые станции сотовых операторов, бытовая электроника, а также устройства, работающие на высоких частотах. Вся эта электромагнитная активность создаёт фон, который может сильно влиять на работу чувствительных компонентов ШПГ.

Эти помехи могут создавать искажения сигнала, нарушая стабильность работы генераторов. Особенно сильно это проявляется в высоконагруженных сетях, где происходит резонанс и интермодуляционные искажения, вызываемые перекрёстными частотами. Для обеспечения стабильной работы генератора необходимо учитывать и компенсировать этот широкий спектр помех.

Механические воздействия, такие как вибрации, удары и динамические деформации, также играют важную роль в эксплуатации ШПГ на открытом воздухе. Особенно это важно для генераторов, установленных на мачтах, транспортных средствах или других подвижных платформах. В таких условиях важно, чтобы устройство было устойчиво к внешним вибрациям, сотрясениям и механическим ударам.

Для эффективной работы таких систем необходимо предусматривать демпфирующие элементы, которые смогут снизить влияние этих нагрузок. Недооценка механических факторов может привести к повреждениям не только внешних частей устройства, но и его внутренних компонентов.

#### *Анализ существующих подходов и ограничений*

Существующие методы защиты ШПГ, такие как герметичные корпуса, пассивное охлаждение и экранирующие материалы, оказываются недостаточными при длительной эксплуатации в условиях экстремальных температур и загрязнённости воздуха. Это приводит к быстрому выходу из строя оборудования, что влечёт за собой высокие затраты на его обслуживание и ремонт.

Корпуса, выполненные из стандартных материалов, не всегда могут обеспечить должную защиту от коррозии, особенно в условиях повышенной влажности и загрязнения. Пассивные системы охлаждения, такие как радиаторы и теплоотводы, часто не могут эффективно работать в условиях сильной жары. Вентиляторы,

требующие регулярного обслуживания, также подвержены механическому износу, что в долгосрочной перспективе снижает их эффективность.

Кроме того, системы электромагнитной защиты, использующие только экранирующие оболочки и фильтры, не способны эффективно защищать от широкополосных и импульсных помех. Эти ограничения требуют разработки новых инженерных решений.

#### *Предлагаемые инженерные решения*

Для преодоления ограничений существующих методов защиты была разработана концепция комплексной модернизации ШПГ, включающая несколько ключевых направлений.

##### ▪ *Конструкция корпуса*

Корпуса ШПГ были модернизированы с использованием многослойных материалов, которые обладают высокой тепловой инерционностью и влагозащитой (рисунок 2). Это решение позволяет минимизировать воздействие резких температурных колебаний, предотвращая их негативное влияние на внутренние компоненты.

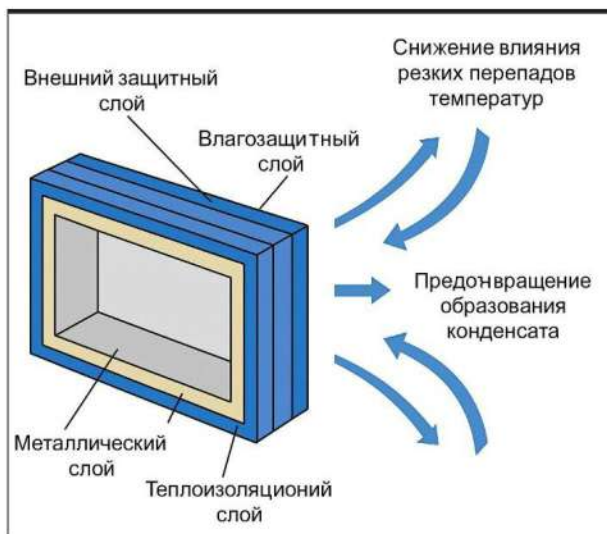


Рисунок 2 – Многослойные материалы

##### ▪ *Система терморегулирования*

Система охлаждения была существенно улучшена за счёт внедрения активных элементов Пельтье (рисунок 3). Эти элементы, в сочетании с интеллектуальной системой управления, обеспечивают точное поддержание температуры в пределах от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ . Это

позволяет поддерживать стабильную работу оборудования при любых внешних условиях.

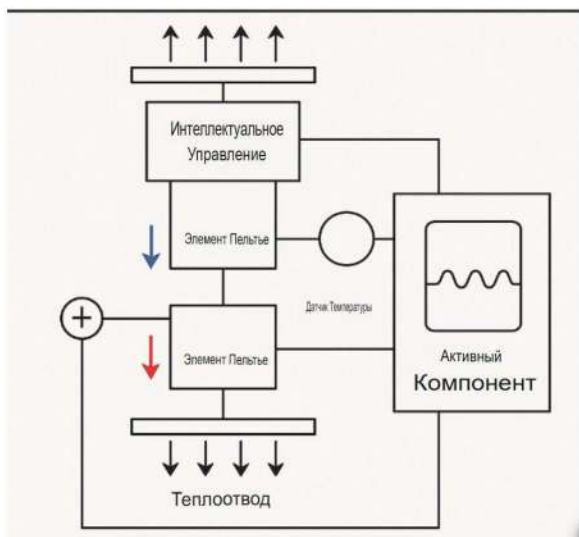


Рисунок 3 – Схема системы активного охлаждения, использующего элементы Пельтье

- *Защита от электромагнитных помех*

Внедрение цифровых алгоритмов компенсации в реальном времени значительно улучшает устойчивость ШПГ к электромагнитным помехам. Эти алгоритмы анализируют спектр входящего сигнала и автоматически настраивают параметры работы генератора, минимизируя искажения и потери сигнала.

- *Оптимизация системы питания*

Для повышения энергоэффективности была внедрена адаптивная схема управления энергопотреблением, которая позволяет снижать потребление энергии в зависимости от нагрузки. Использование импульсных источников питания с высоким КПД также позволяет значительно снизить общий уровень энергозатрат.

*Результаты натурных испытаний*

Комплексные испытания модернизированных ШПГ в различных климатических условиях показали их явное превосходство перед серийными аналогами. В условиях Арктики, при температуре до  $-52^{\circ}\text{C}$ , оборудование стабильно работало с отклонением частоты не более 0.4%. В жарких условиях Астраханской области система активного охлаждения эффективно поддерживала рабочую



температуру на уровне 45°C, при этом потребление энергии было минимальным.

В условиях городской среды с высоким уровнем электромагнитных помех адаптивная система компенсации обеспечила снижение потерь сигнала на 38%, что подтверждает высокую эффективность предложенных решений.

*Расчётная оценка повышения надёжности, теплоотвода и энергоэффективности*

Для количественного подтверждения эффективности внедрённых решений были проведены следующие инженерные расчёты.

▪ *Надёжность оборудования*

Математическая модель надёжности основана на экспоненциальном законе:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов;  $t$  — срок эксплуатации (лет).

$$\text{Серийный генератор: } \lambda_1 = 0.012 \Rightarrow P_1 = e^{-0.012 \cdot 10} \approx 0.886$$

$$\text{Модернизированный: } \lambda_2 = 0.008 \Rightarrow P_2 = e^{-0.008 \cdot 10} \approx 0.923$$

Повышение надёжности:

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100\% \approx 4.2\%$$

Наглядное сравнение надёжности приведено на графике (Рисунок 4).

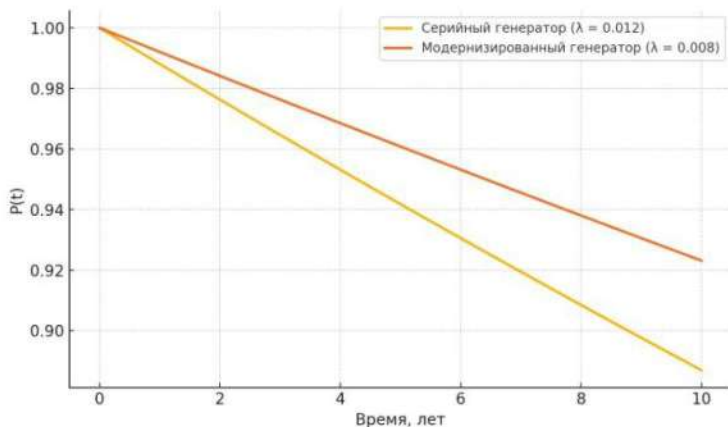


Рисунок 4 – График сравнение вероятности безотказной работы для серийного и модернизированного генераторов

- *Тепловой режим (система Пельтье)*

Теплоотвод системы охлаждения с элементами Пельтье:

$$Q = \alpha \cdot I \cdot T - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c)$$

где  $\alpha=0,045\text{В/К}$  — коэффициент Зеебека,  $I=4\text{А}$  — ток,  $T=323\text{К}$ ,  $R=2\Omega$  — сопротивление модуля,  $K=1\text{Вт/К}$  — теплопередача.

Получим теплоотвод:  $Q \approx 97\text{Вт}$ .

- *Оценка ресурса по термоциклам*

Формула зависимости ресурса от амплитуды теплового цикла:

$$N = \left( \frac{\Delta T_{кр}}{\Delta T_{факт}} \right)^m$$

При  $\Delta T_{кр}=70^\circ\text{С}$ ,  $\Delta T_{факт}=40^\circ\text{С}$ ,  $m=5$ :

$$N = \left( \frac{70}{40} \right)^5 \approx 17$$

т.е. увеличение ресурса более чем в 17 раз по сравнению со стандартной реализацией.

- *Механическая устойчивость к вибрациям*

Допустимое ускорение:

$$a_{дон} = \frac{\sigma_{предел}}{\rho \cdot L}$$

где  $\sigma=90\text{МПа}$ ,  $\rho=2700\text{кг/м}^3$ ,  $L=0,3\text{м}$ :  $a_{дон} \approx 11,3g$

Это соответствует повышенной устойчивости при транспортировке и установке на мачтах.

*Экономическая эффективность*

Предложенные улучшения, хотя и приводят к увеличению первоначальных затрат на 18-22%, обеспечивают значительное снижение операционных расходов. Срок окупаемости дополнительных инвестиций составляет всего 2.3 года, а по итогам 10 лет эксплуатации экономия на обслуживании и ремонте достигает 30%.

*Заключение*

Предложенные в работе технические решения значительно повышают надёжность и долговечность широкополосных генераторов, работающих в сложных климатических и внешних условиях. Интеграция новых технологий, таких как адаптивное управление энергопотреблением и цифровая компенсация электромагнитных помех, открывает новые горизонты для улучшения характеристик подобных устройств.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Надежность радиоэлектронной аппаратуры в экстремальных условиях. – М.: Радиотехника, 2022. – 312 с.
2. Волков, Е. П. Защита от электромагнитных помех в телекоммуникационных системах / Е. П. Волков. – СПб.: БХВ, 2020. – 416 с.
3. Smith, J. Advanced Thermal Management for Electronics / J. Smith, R. Johnson. – New York: IEEE Press, 2021. – 289 p.
4. Zhang, L. Graphene-based EMI Shielding Materials: Recent Advances and Applications / L. Zhang, M. Chen // Advanced Materials. – 2022. – Vol. 34, № 15. – P. 2107145.

УДК 621.396.96

**ГОСТИНА А.А.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ  
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*В статье описаны устройство радиолокационных систем, общие сведения о радиоизлучении и ФАР и их классификации. Рассмотрены основные требования БРЛС и функции УуиК. Обзор электрической схемы УуиК.*

В современном мире радиолокационные системы играют ключевую роль в решении самых разных задач. Особую роль они приобрели в военной сфере, где используются для обнаружения и сопровождения воздушных объектов, а также в научных исследованиях — от изучения рельефа морского дна до дистанционного зондирования поверхности планет. Эти технологии позволяют не только определять координаты целей, но и проводить комплексный анализ их характеристик в режиме реального времени.

С физической точки зрения, радиоизлучение представляет собой особую форму электромагнитных волн. Это часть электромагнитного спектра, к которому также относят ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, видимый свет и другие электромагнитные лучи. Характерной особенностью радиоволн является их способность распространяться в различных средах со скоростью, приближающейся к скорости света в вакууме (около 300 000 км/с). Это делает их идеальным средством передачи сигналов.

Диапазон радиочастот охватывает огромный спектр — от сверхдлинных волн (единицы герц) до терагерцового излучения. Примечательно, что каждому частотному диапазону соответствуют строго определенные физические размеры волн. Так, волны частотой 900 МГц, широко используемые в мобильной связи, имеют длину около 33 см, тогда как низкочастотные колебания 50 кГц характеризуются длиной волны порядка 6 км. Такой широкий частотный диапазон (от миллиметров до сотен километров) позволяет подбирать оптимальные параметры излучения. Например, детальное сканирование земной поверхности или глобальный мониторинг атмосферных процессов других планет.

Размеры волн имеют крайне важное значение в связи и радиолокации. Например, сверхнизкие частоты, размеры которых составляют от 1000 до 10 тысяч километров, способны огибать землю, отражаться от ионосферы. За счет этого они обладают колоссальной дальностью действия. Однако высокочастотные диапазоны такой возможности не имеют, их движение в пространстве примерно похоже на движение видимого света, именно поэтому их используют в военной радиолокации. Низкие частоты для этого непригодны. На это есть три основные причины:

1) Физические размеры антенны излучателя должны соответствовать размерам радиоволн. Для оптимальной работы антенной системы ее геометрические параметры должны быть согласованы с длиной излучаемых радиоволн. Такое соответствие обеспечивает резонансный режим работы, существенно повышающий эффективность излучения. Хотя антенна сохраняет способность принимать сигналы близких частот, ее рабочие характеристики в этом случае значительно ухудшаются. Технически невозможно создать компактные сантиметровые передатчики для генерации волн километрового диапазона. Следовательно, оборудование для низкочастотного излучения неизбежно имеет крупногабаритные размеры. Подобные конструктивные особенности делают такие системы малопригодными для военных радиолокационных комплексов. Аналогичные ограничения наблюдаются и в других областях применения радиотехнических устройств.

2) Радиоволны коротковолнового диапазона демонстрируют значительно меньшую склонность к дифракционным искажениям по сравнению с низкочастотными сигналами. Интенсивность этого явления находится в прямой зависимости от частоты излучения - чем ниже рабочая частота, тем более выраженным становится эффект дифракции. Хотя длинноволновое излучение обладает способностью

огibtать естественные препятствия, такие как горные массивы, и не сталкивается с проблемой радиогоризонта, как изображено на рисунке 1, это преимущество сопровождается существенным недостатком. Точное определение пространственных координат объектов при использовании таких частот становится технически невозможной задачей.

3) Для эффективного отражения низкочастотных радиоволн от объекта необходимо, чтобы его физические размеры были сопоставимы или превышали длину излучаемой волны. В практическом плане это означает, что при длине волны свыше 200 метров в воздушном пространстве практически не существует целей, способных обеспечить качественное отражение сигнала. Данное обстоятельство существенно ограничивает применение длинноволнового диапазона в радиолокационных системах, предназначенных для обнаружения воздушных объектов.

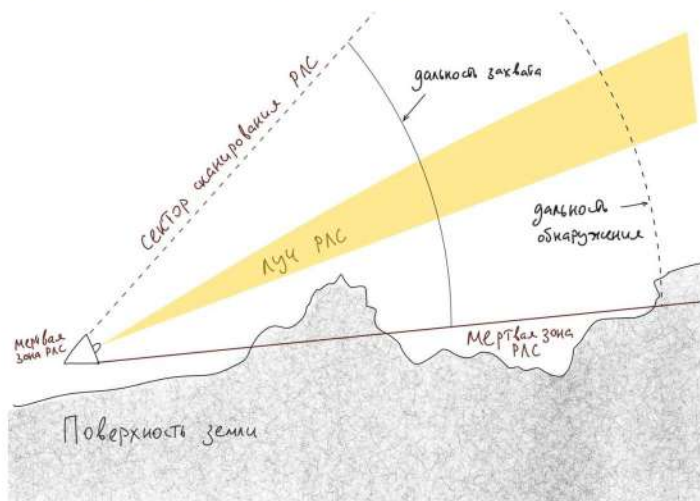


Рисунок 1 – Пример распространения сигнала

Дадим определение РЛС и подробнее рассмотрим устройство системы. Радиолокационные системы (РЛС) — представляет собой радиотехническую систему, которая предназначена для обнаружения объектов в пространстве, определение их координат, скоростей и получения дополнительных характеристик с помощью радиоволн.

В данной статье будет использоваться сокращение БРЛС, что расшифровывается как бортовая радиолокационная система, а также УуиК — устройство управления и контроля.

Но перед описанием устройства УуиК рассмотрим основные составляющие РЛС в общих чертах:

- 1) Передатчик
- 2) Приемник

Принцип действия радиолокационной системы основан на генерации передатчиком электромагнитных волн, которые при взаимодействии с объектами изменяют свои характеристики в зависимости от свойств отражающей поверхности. Специальный приемный блок улавливает и преобразует возвратившиеся сигналы, подвергая их сложной обработке. Ключевыми параметрами для анализа становятся направление прихода волны, временной интервал между излучением и приемом, а также изменение частотных характеристик отраженного сигнала. Эти данные служат основой для точного вычисления пространственного положения объекта, его скорости перемещения, угловых координат и расстояния до цели.

Особое значение в работе радиолокационных станций имеет физическое явление, известное как эффект Доплера. Суть этого феномена заключается в изменении частотных параметров электромагнитного излучения при его отражении от движущихся объектов. Когда цель приближается к радиолокатору, наблюдается повышение частоты принимаемого сигнала - этот эффект специалисты называют положительным доплеровским смещением. В противоположной ситуации, при удалении объекта от станции, фиксируется снижение частоты отраженных волн, что соответствует отрицательному доплеровскому смещению. Доплеровские РЛС могут выделять движущиеся цели и игнорировать неподвижные объекты.

Характеристики отраженного радиолокационного сигнала определяются несколькими ключевыми факторами. На силу вторичного излучения влияют различия в электрических свойствах между объектом и окружающей средой, геометрическая форма цели, соотношение ее габаритов с длиной волны, а также параметры поляризации электромагнитного излучения. Принятый антенной рассеянный сигнал преобразуется и усиливается в специальном приемном блоке перед дальнейшей обработкой.

Стандартная архитектура радиолокационной станции, представленная на рисунке 2, состоит из нескольких основных узлов. Центральным элементом системы является передатчик, генерирующий зондирующий сигнал, который излучается через передающую антенну. Отраженные волны улавливаются приемной антенной и поступают в радиоприемник, где происходит их усиление и преобразование. Обработанная информация выводится на индикаторные устройства, а

конечные данные передаются через выходной интерфейс. Каждый из этих компонентов выполняет строго определенную функцию в процессе радиолокационного зондирования.

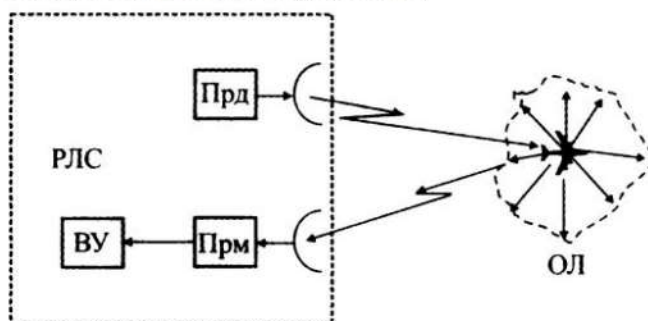


Рисунок 2 – Пример принципа работы простейшей РЛС

#### *Тактико-технические параметры РЛС*

Тактико-технические параметры — это набор свойств, характеризующих качество РЛС. Они определяют возможности системы, основными из которых являются: область обзора (рабочая область), помехоустойчивость, разрешающая способность, точность, пропускная способность, эксплуатационная эффективность и надежность.

Область обзора — это область пространства, в которой могут обеспечиваться надежное обнаружение целей с заданными характеристиками. Этот параметр определяется: вероятностью корректного обнаружения (не менее 0,8-0,95); допустимым уровнем ложных тревог (обычно  $10^{-6}$  -  $10^{-8}$ ); минимальной эффективной площадью рассеяния целей

Разрешающая способность — оценивает возможность раздельного определения координат близко расположенных объектов. Минимальный интервал близкорасположенных объектов составляет 0,5-50 м. Цели с малыми угловыми расхождениями 0,1-5°, разнесенные по дальности объекты (дискретность 5-500 м)

Точность — отражает близость результатов измерения к истинному значению измеряемой величины. Он включает в себя погрешности координат (обычно 3-50 м), ошибку измерения скорости (0,1-5 м/с), точность углового позиционирования (0,01-1°).

Помехоустойчивость — способность системы обнаруживать сигналы с требуемой вероятностью и точностью при воздействии естественных или искусственных радиопомех определенного типа.

Пропускная способность — способность РЛС обеспечивать одновременную работу с рядом объектов.

Надежность — свойство РЛС сохранять тактические параметры в заданных пределах и условиях эксплуатации в течение требуемого интервала времени.

#### *Способы обзора пространства*

Современные радиолокационные системы способны одновременно обрабатывать данные о множестве объектов, находящихся в зоне их действия. Для этого применяются различные методы сканирования пространства, включая последовательный, параллельный и комбинированный подходы, которые определяют архитектуру как отдельных станций, так и целых радиолокационных комплексов.

Характеристики распространения радиоволн имеют принципиальное значение для работы таких систем. Область распространения, называемая диаграммой направленности, формируется в зависимости от конструктивных особенностей антенного устройства. Для наглядности можно провести аналогию с источниками света — излучение простой штыревой антенны рассеивается подобно свету от открытой лампы, в то время как фазированная антенная решетка создает узконаправленный пучок, сравнимый с лучом прожектора. Именно такая направленность позволяет значительно увеличить мощность полезного сигнала и снизить влияние помех по сравнению с ненаправленными антеннами.

При анализе диаграммы направленности, изображенной на рисунке 3, можно заметить, что помимо основного луча присутствуют дополнительные боковые лепестки излучения. Их природа схожа с работой отражателя в карманном фонаре — специальная конструкция обеспечивает концентрацию энергии в заданном направлении, что позволяет эффективно сканировать определенный сектор пространства. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации радиолокационного оборудования.

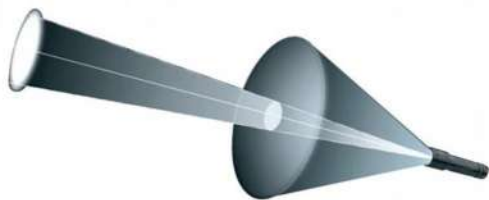


Рисунок 3 – Распространение света от фонарика



### Общие сведения о фазированных антенных решетках

В радиолокационных системах, основанных на современной технологии обработки информации, используют фазированные антенные решетки (ФАР) в качестве антенн, устройства синтеза и синхронизации частоты — генератор запускающих импульсов, а цифровые процессоры в качестве выходных устройств. Принцип работы такой решетки примерно такой: схема изменяет фазу сигнала в каждом элементе и формирует луч без механического поворота антенны. Это позволяет быстро сканировать пространство и одновременно сопровождать несколько целей.

ФАР разбивают на два типа:

- ПФАР — пассивная фазированная антенная решётка.
- АФАР — активная фазированная антенная решётка.

В АФАР каждый элемент решетки имеет свой приемник и передатчик, который сокращенно называют Т/Р модуль (от англ. T/R module – *Transmit/Receive module*). У подобного решения есть ряд преимуществ, например, высокая энергоэффективность и помехозащищенность, так как существует возможность гибкого управления лучами. Также при выходе из строя одной части элементов, система сохраняет работоспособность за счет других частей. Активные ФАР использовали на Н036 «Белка» (Су-57, Россия) и AN/APG-77 (F-22 Raptor, США).

В ПФАР имеется множество приемных элементов, но только один центральный передатчик, а именно клистрон или ЛБВ. Лампа бегущей волны и клистрон — это мощные электровакуумные приборы для генерации и усиления СВЧ-сигналов. Особенностью ПФАР является относительная дешевизна. Однако присутствует больше энергопотребление за счет потерей в мощности сигнала из-за особенностей конструкции. Система менее гибкая, так как луч формируется аналоговыми фазовращателями. Пассивные ФАР использовали на Н035 «Ирбис» (Су-35, Россия) и AN/APG-63(V)2 (F-15C, США).

Таблица 1 – Сравнение типов ФАР

Параметр	АФАР	ПФАР
Передатчик	Индивидуальный для каждого элемента	Один общий
Гибкость	Максимальная (адаптивные лучи)	Ограниченная
Надёжность	Выше (распределённая система)	Ниже (зависит от центрального передатчика)

Параметр	АФАР	ПФАР
Стоимость	Дороже	Дешевле
Примеры	Су-57 (Н036), F-35 (APG-81)	Су-35 (Н035), F-15 (APG-63)

Современные радиолокационные комплексы нового поколения включают в себя несколько ключевых компонентов:

1. Фазированную антенную решетку
2. Генератор тактовых частот с синхронизацией
3. Аналоговый приемный тракт
4. Цифровой процессор обработки сигналов
5. Информационно-отображающую систему

Ниже на рисунке 4 изображен пример современной РЛС.



Рисунок 4 – Современная РЛС

#### *Классификация видов радиолокационных систем*

Современные радиолокационные системы подразделяются на две принципиально разные категории по способу работы. Первый тип — пассивные системы, функционирующие за счет приема собственного излучения объектов после его отражения от их поверхности. Второй тип — активные системы, использующие отраженный от целей зондирующий сигнал, который изначально генерируется самой станцией.

Активные радиолокационные комплексы имеют две модификации: активная радиолокация с активным ответом и радиолокация с пассивным ответом. Первая предполагает наличие на объекте специального ответного устройства. Принятый сигнал обрабатывается и возвращается обратно, что существенно расширяет рабочий диапазон системы, хотя и снижает ее устойчивость к помехам. Вторая модификация использует принцип бистатической локации, когда в качестве источника излучения применяются посторонние передатчики - теле- и радиовещательные станции, базовые станции

сотовой связи или спутниковые системы. Такой подход обеспечивает высокую скрытность работы, энергоэффективность и устойчивость к противодействию при относительно невысокой стоимости оборудования.

#### *Основные требования БРЛС и функции УУиК*

В настоящее время БРЛС позволяют вести воздушную разведку в дневное и ночное время суток, осуществлять обнаружение и распознавание наземных, воздушных и морских целей, а также обеспечивать в случае необходимости нанесение по ним ударов в ночных и сложных метеоусловиях.

Среди основных требований, предъявляемых к современным БРЛС выделяют:

- возможность функционировать в любое время суток независимо от погодных условий;
- большое мгновенное поле зрения (панорамный обзор);
- точная идентификация и высокое разрешение целей;
- дальность действия БРЛС должна превышать периметр безопасности летательного аппарата;
- адаптирование информации;
- минимальные массогабаритные характеристики и уровень потребляемой энергии.

Проектируемое устройство, изображенное на рисунке 5, входит в изделие Н-035 «Ирбис-Э», и предназначено для обеспечения круглосуточного, всепогодного применения на новых модификациях истребителей семейства Су-27 – в первую очередь на самолете Су-35. Построено оно на ПФАР, значит Ирбис» – это радиолокатор с активным излучением и пассивной антенной.

Изделие УУиК выполняет следующие основные функции:

- обнаружение и сопровождение воздушных, наземных и надводных целей;
- определение госпринадлежности, распознавание класса и типа воздушных целей;
- определению количества воздушных целей в группе;
- формирование радиолокационного изображения подстилающей поверхности (карты местности);
- коррекция навигационных систем;
- измерение дальности;
- наведение ракет с радиолокационными головками самонаведения (РГС).



Рисунок 5 – Изделие УУиК

Первоначально УУиК размещается на блоке Н035, и имеет ограничения в допустимых размерах, поэтому оптимальной формой изделия является прямоугольный параллелепипед. Эта форма позволяет снизить расход материалов, является достаточно легкой в производстве и эксплуатации. В данном случае для соблюдения требований по массе и габаритам предполагается использование лёгких материалов и сплавов, а также выбор оптимальной элементной базы.

#### *Обзор электрической схемы УУиК*

На БРЛС Су-35 используют печатную плату УУиК старого образца. Схема изображенная на рисунке 6 построена на ТПЛ логических элементах. В настоящее время это уже достаточно устаревшая технология, которая имеет ряд недостатков:

Для работы устройства нужно большое количество микросхем-счетчиков, триггеров, инверторов и т.д.;

Это влечет за собой большую массу изделия, высокое энергопотребление и нагрев элементов, меньшую надежность конструкции, и один из главных недостатков- если во время испытаний выясняется какой-либо недостаток схемы, устройство нужно отзывать, и полностью переделывать.

Высокая плотность монтажа, что также влечет за собой высокие температуры элементов на плате.

В качестве времязадающего элемента используется микросхема 133АГЗ, представляющая собой сдвоенный одновибратор, точность работы которого ниже, чем у современных решений.

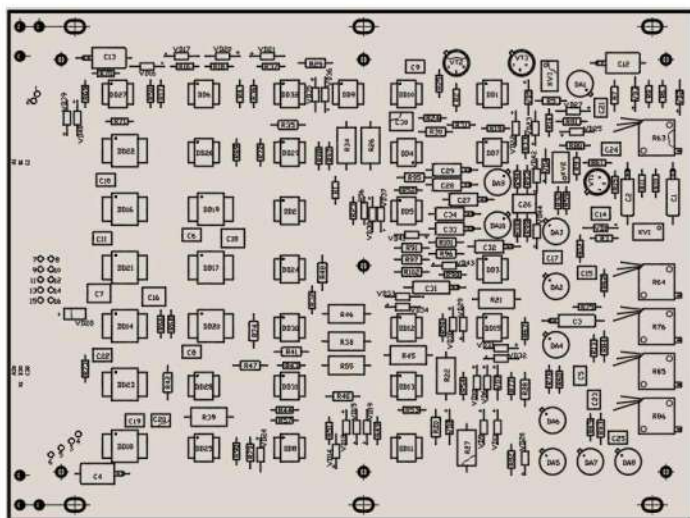


Рисунок 6 – Печатная плата УУиК старого образца

На рисунках 7 и 8 мы видим разрабатываемую печатную плату. Схема построена уже на основе микросхемы 1986BE1T.

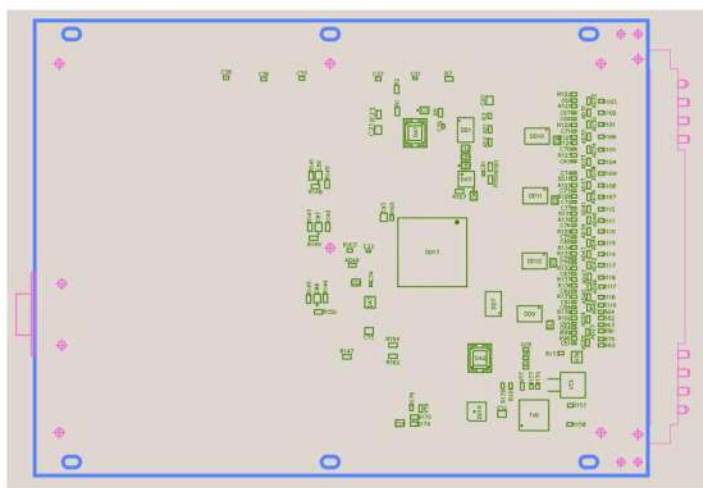


Рисунок 7 – Печатная плата нового образца

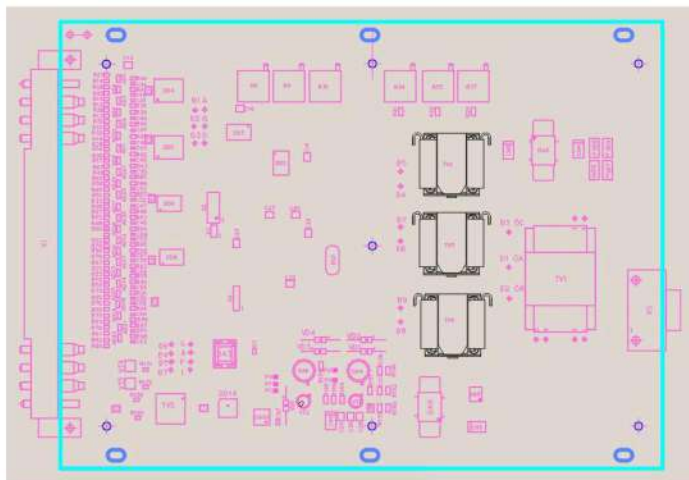


Рисунок 8 – Печатная плата нового образца

Это специализированный 32-разрядный микроконтроллер комплексом связи с для авиационного применения. Периферия микроконтроллера включает контроллер USB интерфейса со встроенным аналоговым приёмопередатчиком и со скоростью передачи до 12 Мбит/с, авиационные интерфейсы по ГОСТ 18977-79 (ARINC-429) и ГОСТ P52070-2003 (МКИО, МКПД, MIL-STD-1553), цифровой интерфейс Ethernet со скоростью передачи до 100 Мбит/с. Микроконтроллер предназначен для работы в радиоэлектронной аппаратуре специального назначения.

Использование микроконтроллера дает ряд преимуществ:

- Меньшая трудоемкость при разработке;
- Меньшее количество элементов и плотность монтажа;
- Меньшее энергопотребление;
- Возможность изменения настроек устройства при испытаниях.

Как мы можем видеть, основным элементом в схеме (рисунок 9) является микроконтроллер. Питается напряжением от 3 до 3.6 вольт, частота задается внешним кварцевым резонатором на 16 МГц. Резонатор должен устанавливаться в непосредственной близости с выводами микроконтроллера.

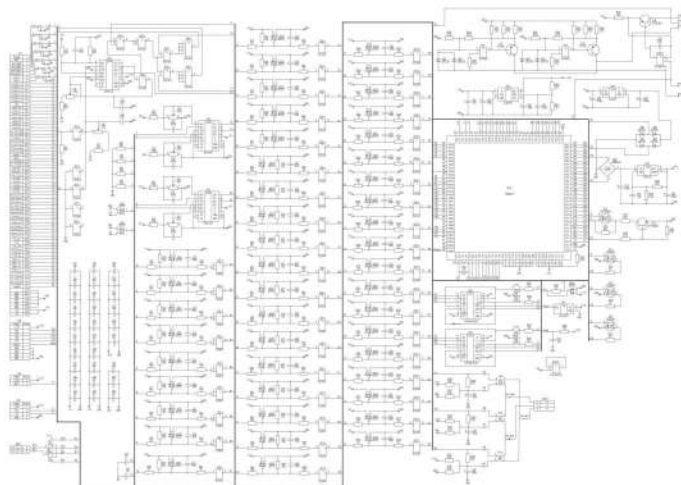


Рисунок 9 – Принципиальная схема УУиК

Благодаря описанной выше информации о радиоизлучении и БРЛС, смею заметить, что использование ПФАР — не плохое решение. Тем более не на всех моделях истребителей 2000-го года возможно изменить систему на АФАР. В настоящее время, например БРЛС Н035 на Су-35 оснащают пассивной ФАР, но с очень высокими характеристиками, близкими к ранним АФАР.

На основании электрической принципиальной схемы в данной статье описано конструктивное решение для устройства управления и контроля, предназначенное для обеспечения круглосуточного, всепогодного применения в БРЛС самолета Су-35.

#### *Заключение*

В статье рассмотрены ключевые аспекты радиолокационных систем, их классификация, принципы работы и современные технологии, такие как фазированные антенные решётки (ФАР). Особое внимание уделено бортовым радиолокационным системам (БРЛС), их тактико-техническим параметрам, а также устройству управления и контроля (УУиК) на примере РЛС Н035 «Ирбис» истребителя Су-35.

Показано, что несмотря на активное развитие активных ФАР (АФАР), пассивные ФАР (ПФАР) остаются востребованными благодаря их надежности, относительно низкой стоимости и высокой эффективности в определенных условиях. Пример БРЛС «Ирбис» демонстрирует, что даже ПФАР могут обеспечивать высокие характеристики, сопоставимые с ранними АФАР, что делает их актуальными для модернизации существующих платформ.

Описанное в статье конструктивное решение УУиК на основе современного микроконтроллера позволило значительно улучшить эксплуатационные параметры устройства: снизить массу и габариты, повысить надежность и адаптивность к изменяющимся условиям работы. Это подтверждает важность цифровизации и миниатюризации компонентов в современных радиолокационных системах.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004, – 320 с.
2. Поляков В.Т. Посвящение в радиоэлектронику. – М.: Радио и связь, 1988. – 352 с.
3. Лобанов М.М. Из прошлого радиолокации. – М.: «Воениздат», 1969. – 208с.
4. Случевский Б.Ф. Радиолокация и ее применение. – М.: «Воениздат», 1962. — 255с.
5. Леонов А.И. Радиолокация в противоракетной обороне. – М.: Воениздат, 1967. – 136 с.
6. Бердышев В.П., Гарин Е.Н., Фомин А.Н., Тяпкин В.Н., Фатеев Ю.Л., Лютиков И.В., Богданов А.В., Кордюков Р.Ю. Радиолокационные системы (Радиолокационные системы) – 2-е изд. – Красноярск: СФУ, 2021. – 400 с.

УДК 004.451.62

**ГУРОВ А.С.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ**

*Рассматриваются возможные варианты интеграции информационных систем. Приводится описание подходов к интеграции информационных систем.*

Для автоматизации работы подразделений на предприятиях используются информационные системы. Зачастую в автономных подразделениях эти информационные системы автоматизируют различные бизнес-процессы. Такие информационные системы, как правило, не связаны между собой, используют только свои источники данных, и по-разному описывают бизнес-процессы. Возникает



проблема полноты информационных данных, противоречий данных, их задержки и разного рода ошибок.

Решением описанной выше проблемы может послужить интеграция информационных систем. Интеграция информационных систем – это процесс слияния независимых информационных систем для их совместной работы и обмена информацией в режиме реального времени [1].

Интеграцию информационных систем можно разделить на следующие возможные варианты:

1. Структурные шаблоны интеграции;
2. Шаблоны по методу интеграции;
3. Шаблоны интеграции по типу обмена данными [2].

Структурные шаблоны интеграции описывают способы взаимодействия интегрированных информационных систем. Структурные шаблоны подразделяются на следующие подходы к интеграции:

1. Взаимодействие «точка-точка»;
2. Взаимодействие «звезда»;
3. Смешанный способ взаимодействия.

Взаимодействие «точка-точка» предоставляет интерфейс только одной пассивной информационной системы (поставщика данных) для доступа к ней всех остальных активных информационных систем (потребителей данных). Такой подход применяется для стихийной интеграции информационных систем, когда эти системы объединяются без единой инфраструктуры. Взаимодействие «точка-точка» не пригодно для использования в качестве активной (потребителем данных) другой информационной системы.

Взаимодействие «звезда» предоставляет интерфейс в одной «центральной» информационной системе – интегрирующей среде, используемой для управления взаимодействием других информационных систем. Интегрирующая среда должна иметь универсальный интерфейс, используемый для доступа к нему других активных информационных систем (потребителей данных). Интегрирующая среда может при необходимости использовать интерфейсы пассивных информационных систем (поставщиков данных). Вся информационная система в целом реализует такие уровни интегрирующей среды, как: базовый уровень (ядро интегрирующей среды), уровень сценариев интеграции (графическая схема и алгоритмы обмена сообщениями между информационными системами), транспортный уровень (доставка сообщений), уровень

адаптеров компонентов (генерация и передача сообщений базовому уровню).

Смешанный способ взаимодействия совмещает в себе два предыдущих подхода интеграции. Здесь в информационных системах выполняется централизация управления взаимодействием других информационных систем, а также частично могут напрямую использоваться интерфейсы в обход интегрирующей среды.

Шаблоны по методу интеграции описывают архитектуру объединения интегрированных информационных систем. Существуют следующие методы интеграции:

1. Интеграция информационных систем по данным;
2. Функционально-центрический подход;
3. Объектно-центрический подход;
4. Концептуально-центрический подход (подход на основе единой понятийной модели предметной области).

Интеграция информационных систем по данным характерен для традиционной архитектуры «клиент-сервер». Здесь интегрирующей средой является система управления базами данных. Интеграция информационных систем происходит за счет разработки интегрированной базы данных общего доступа и объединения информационных систем вокруг интегрированных данных. Ключевым недостатком данного подхода интеграции является передача данных больших объемов.

Функционально-центрический подход характерен для сервисов, то есть системных прикладных функций коллективного доступа, представляющих из себя серверные программы со стандартным программным интерфейсом приложения – Application Programming Interface (API). Здесь интегрирующей средой являются сервисы, реализующие различного вида функции информационных систем.

Объектно-центрический подход характерен для стандартов объектного взаимодействия. Здесь интегрирующей средой выступает брокер объектных запросов с интерфейсом, используемым в стандартах технологий COM/DCOM, CORBA и .NET.

Концептуально-центрический подход характерен для программного обеспечения, разработанного на основе приложений класса MOM (Message-Oriented Middleware). Примерами таких приложений могут служить: Microsoft Message Queuing (MSMQ), RabbitMQ, Apache ActiveMQ, IBM MQ, Kafka. Единицей информационного обмена приложений этого класса являются сообщения. Интегрирующей средой данного подхода выступает общесистемный язык взаимодействия компонентов, разработанный на

основе единой понятийной модели, представляющей объекты предметной области, их поведение и взаимосвязи. Единую понятийную модель составляет база метаданных (информаций о данных, об их содержании, составе, объеме, форматах, условиях доступа и т.д.), хранящая информацию об интерфейсных бизнес-объектах всех интегрируемых компонентов, о связях (отношениях) между этими объектами и их поведении.

Шаблоны интеграции по типу обмена данными описывают организацию обмена информацией между различными компонентами интегрированных информационных систем. По типу обмена данными шаблоны интеграции подразделяются на следующие основные подходы:

1. Передача файлов;
2. Разделяемая база данных;
3. Удаленный вызов процедуры и методов;
4. Обмен сообщениями.

Передача файлов – один из самых старых и используемых подходов к интеграции информационных систем. Идея данного подхода заключается в общем доступе интегрируемых приложений к одному и тому же файлу. Здесь файл выступает в качестве универсального механизма обмена данными между интегрируемыми приложениями. В наиболее ранних приложениях популярным стандартным форматом таких файлов выступал простой текстовый файл. Современные приложения для интеграции используют файлы форматов XML, CSV.

В разделяемой базе данных идея взаимодействия между приложениями заключается в синхронизации общего доступа к базе данных, хранящей общие данные. Наиболее простой и популярной реализацией общей баз данных служит использование реляционной базы данных с поддержкой запросов SQL. Примером данного подхода служат многие ERP-системы, в которых одну базу данных используют различные модули информационной системы.

В удаленном вызове процедуры и методов идея взаимодействия между приложениями заключается в осуществлении удаленного вызова процедур, которые используются для выполнения действий или обмена данными. Суть данного подхода заключается в использовании принципов инкапсуляции данных для интеграции информационных систем. Удаленный вызов процедуры и методов поддерживается такими технологиями, как Java RMI, RPC, COM/DCOM, CORBA, .NET Remoting.

Идея обмена сообщениями заключается в применении системы обмена сообщениями, использующейся для выполнения действий или обмена данными. Система обмена сообщениями, как и передача файлов, обеспечивает слабое связывание интегрируемых информационных систем. Большое достоинство асинхронного обмена сообщениями в том, что одновременная доступность получателя и отправителя сообщения не требуется [3]. Во время передачи сообщения могут быть преобразованы без уведомления получателя или отправителя.

Общая база данных обеспечивает более частый обмен данными между приложениями согласованного формата. Удаленный вызов процедуры используется для интеграции функциональности интегрируемых приложений. Обмен сообщениями применяется для частого обмена данными между приложениями малыми порциями (иногда, иницилирующими вызовы удаленных функций).

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Рындин А.А., Саргсян Э.Р. Современные стандарты информационного взаимодействия систем : учеб. пособие / А.А. Рындин, Э.Р. Саргсян; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 144 с.
2. Гончаренко А.Н. Интегрированные информационные системы : учеб. пособие / А.Н. Гончаренко. – М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2018. – 74 с.
3. Советов Б.Я., Водяхо А.И., Дубенецкий В.А., Цехановский В.В. Архитектура информационных систем : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Б.Я. Советов, А.И. Водяхо, В.А. Дубенецкий, В.В. Цехановский. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с.

УДК 004.658

**ДОРОШИН Е.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

*В статье рассматривается разработка и реализация информационно-управляющей системы (ИУС) для геологоразведочных работ, включая принципы ее*

*создания, архитектуру и этапы реализации, а также примеры успешного внедрения в практике компаний.*

Геологоразведочные работы включают в себя сбор, обработку и анализ значительных объемов данных для оценки и разработки минеральных ресурсов. Эффективное управление этими данными имеет решающее значение для повышения точности прогнозов и оптимизации процессов. В этой статье мы рассмотрим разработку и реализацию информационно-управляющей системы (ИУС) для геологоразведочных работ, которая позволит упростить информационные потоки и повысить эффективность управления проектами.

Принципы разработки ИУС:

1. Мультиагентный подход: Использование мультиагентных систем позволяет создать единую платформу для обмена данными между различными участниками проекта, включая геологов, инженеров и менеджеров. Это обеспечивает параллельное взаимодействие и совместную работу над проектом в режиме реального времени.

Мультиагентные системы позволяют автоматизировать процессы принятия решений и оптимизировать взаимодействие между различными подразделениями. Например, компания «Газпром» использует мультиагентные системы для координации действий различных подразделений при разработке месторождений. Это позволяет сократить время на принятие решений и повысить эффективность управления проектами.

2. Интегрированные операции: Концепция интегрированных операций предполагает объединение всех этапов геологоразведочных работ в единую систему, что упрощает передачу данных и повышает их точность.

Интегрированные операции включают в себя не только геологоразведочные работы, но и процессы добычи и переработки полезных ископаемых. Например, компания «Роснефть» использует интегрированную систему управления проектами, которая позволяет автоматизировать процессы планирования и контроля геологоразведочных работ. Это позволяет оптимизировать производственные процессы и повысить эффективность использования ресурсов.

3. Цифровые платформы: Использование цифровых платформ для реализации ИУС позволяет автоматизировать процессы сбора, обработки и анализа данных, а также обеспечивает доступ к информации всем заинтересованным сторонам.

Цифровые платформы, такие как «Petrel» от Schlumberger, широко используются для управления данными и моделирования геологических процессов. Эти платформы позволяют создавать трехмерные модели месторождений и прогнозировать запасы полезных ископаемых. Это существенно повышает точность прогнозов и оптимизирует процессы разработки месторождений.

Архитектура ИУС должна включать следующие компоненты:

- Информационный блок: Содержит фактографические и картографические данные, которые могут поступать как из ручных источников, так и от автоматизированных средств мониторинга. Этот блок обеспечивает сбор и хранение данных о геологических процессах и свойствах месторождений.

- Модельный блок: Включает в себя системы моделей геологических процессов, которые используются для прогнозирования и анализа состояния недр. Модели могут быть статистическими или физическими и позволяют прогнозировать запасы полезных ископаемых и их свойства.

- База данных: Централизованное хранилище данных, которое позволяет накапливать и обновлять информацию в режиме реального времени. База данных обеспечивает доступ к информации всем заинтересованным сторонам и позволяет автоматизировать процессы принятия решений.

Геологоразведочные работы проводятся в несколько этапов:

- Поисковый этап: Включает региональные геолого-геофизические работы, подготовку площадей к глубокому поисковому бурению и бурение поисковых скважин. На этом этапе определяются перспективные площади для дальнейшего изучения.

Пример: Компания «Норникель» использует передовые геофизические методы для поиска новых месторождений на Кольском полуострове. Это позволяет выявить потенциальные запасы полезных ископаемых и оптимизировать процессы разработки месторождений.

- Разведочный этап: Целью является получение точной информации о запасах полезных ископаемых и их свойствах. На этом этапе проводятся детальные геологические и геофизические исследования.

Пример: Разведочные работы на месторождении «Сухой Лог» показали значительные запасы золота, что привело к увеличению инвестиций в проект. Это позволило оптимизировать процессы добычи и переработки золота.

- Эксплуатационная разведка: Проводится в течение всего периода освоения месторождения для обеспечения оперативного

планирования горноподготовительных работ. Эта разведка позволяет оптимизировать процессы добычи и повысить эффективность использования ресурсов.

Пример: Компания «Полюс» использует эксплуатационную разведку для оптимизации добычи золота на своих месторождениях. Это позволяет оперативно корректировать планы добычи и повышать эффективность использования ресурсов.

Реализация ИУС предполагает несколько этапов:

- Разработка концепции: Определение требований и целей системы на основе анализа существующих процессов и информационных потоков. Этот этап включает в себя анализ потребностей компании и определение целей реализации ИУС.

Пример: Разработка концепции ИУС для компании «Русал» включала анализ существующих информационных систем и определение потребностей в автоматизации. Это позволило создать эффективную систему управления данными и повысить эффективность принятия решений.

- Проектирование архитектуры: Создание подробной архитектуры системы, включая информационный и модельный блоки. Этот этап включает в себя проектирование базы данных и интеграцию с существующими информационными системами.

Пример: Проектирование архитектуры ИУС для компании «Газпром нефть» включало создание единой платформы для управления данными и моделирования геологических процессов. Это позволило оптимизировать процессы принятия решений и повысить эффективность управления проектами.

- Внедрение цифровых платформ: Использование современных цифровых технологий для автоматизации процессов и обеспечения доступа к информации. Цифровые платформы позволяют автоматизировать процессы сбора и анализа данных.

Пример: Внедрение цифровой платформы «SAP» в компании «Лукойл» позволило автоматизировать процессы управления данными и повысить эффективность принятия решений. Это также позволило оптимизировать производственные процессы и повысить эффективность использования ресурсов.

- Тестирование и внедрение: Проведение тестирования системы и ее внедрение в производство. Этот этап включает в себя проверку функциональности системы и ее совместимость с существующими информационными системами.

Пример: Тестирование ИУС в компании «Роснефть» включало проверку функциональности системы и ее совместимость с

существующими информационными системами. Это позволило выявить и устранить возможные ошибки и оптимизировать процессы управления проектами.

Компания АЛРОСА успешно внедрила систему управления производственной деятельностью (СУПД) для среднесрочного планирования и контроля геологических проектов. Также была разработана информационно-аналитическая система «Диспетчер ВГРЭ» для оперативного планирования и диспетчеризации геологоразведочных работ.

Разработка и реализация информационно-управляющей системы для геологоразведочных работ позволит существенно повысить эффективность управления проектами, улучшить качество данных и сократить время их обработки. Использование мультиагентных подходов и цифровых платформ обеспечивает создание единого информационного пространства, которое упрощает обмен данными и поддерживает связь между участниками проекта.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Назарова З.М., Косьянов В.А., Забайкин Ю.В., и др. Управление, организация и планирование геологоразведочных работ. – Москва: National Research, 2020. – 752 с.
2. Туренко С.К. Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобыче: Материалы докладов международного научно-практического семинара. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. – 225 с.
3. Сальманов С.М. Методологические основы организации информационных потоков при управлении проектами геологоразведочных работ // Прогрессивная экономика. – 2024. – № 9.
4. Управление качеством геологоразведочных работ в контексте достижения стратегических целей ООО «Газпром геологоразведка» // CyberLeninka.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-geologorazvedochnyh-rabot-v-kontekste-dostizheniya-strategicheskikh-tseley-ooo-gazprom-geologorazvedka/viewer> (дата обращения 05.04.2025).
5. Система информационно-аналитического обеспечения геолого-геофизических исследований и управления недропользованием // dissercat.com [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dissercat.com/content/sistema-informatsionno-analiticheskogo-obespecheniya-geologo-geofizicheskikh-issledovaniy-i-> (дата обращения 05.04.2025).



УДК 658.562

**ДОРОШИН Е.Д.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

*В статье рассматривается развитие информационных технологий в нефтегазовой отрасли, включая перспективы цифровой трансформации и примеры успешного внедрения для повышения эффективности. Обсуждаются будущие тенденции и вызовы цифровизации.*

Нефтегазовая отрасль переживает революционные изменения благодаря активному внедрению цифровых технологий. Этот процесс затрагивает все аспекты деятельности - от разведки месторождений до сбыта готовой продукции, создавая принципиально новые возможности для повышения эффективности.

Современные цифровые решения становятся не просто инструментом оптимизации, а фундаментом для построения интеллектуальных производственных систем. Особое значение приобретают технологии цифровых двойников, которые позволяют создавать виртуальные копии реальных объектов. Например, "Газпром нефть" уже успешно использует такие модели для тестирования различных сценариев разработки месторождений без риска для реального производства. Аналогичный подход применяет Shell для мониторинга состояния морских платформ.

Искусственный интеллект и машинное обучение открывают новые горизонты в анализе огромных массивов производственных данных. Эти технологии не только помогают прогнозировать состояние оборудования, но и позволяют оптимизировать процессы бурения, существенно повышая их точность и безопасность. Особенно перспективным выглядит применение ИИ для более точной оценки запасов углеводородов.

Не менее важную роль играет промышленный интернет вещей. Сети датчиков, охватывающие все технологическое оборудование, обеспечивают непрерывный мониторинг ключевых параметров. Это позволяет перейти от традиционного планового обслуживания к предиктивному, когда ремонтные работы выполняются именно тогда, когда они действительно необходимы, а не по заранее установленному графику.

Блокчейн-технологии привносят в отрасль новый уровень прозрачности и безопасности. Они находят применение не только в

финансовых операциях, но и в управлении цепочками поставок, что особенно важно для такой глобализированной отрасли, как нефтегазовая.

Ожидаемый экономический эффект от цифровой трансформации впечатляет. Для российских компаний он может превысить 700 млрд рублей в год за счет комплексной оптимизации всех производственных процессов. Однако для реализации этого потенциала потребуются значительные инвестиции не только в технологии, но и в подготовку кадров, способных эффективно работать в новых условиях.

Важно понимать, что цифровая трансформация - это не разовое мероприятие, а непрерывный процесс, требующий переосмысления традиционных подходов к управлению производством. Компании, которые смогут наиболее полно реализовать этот потенциал, получат серьезные конкурентные преимущества на глобальном рынке энергоресурсов. Цифровая трансформация нефтегазового сектора создает перспективы для экономического развития благодаря модернизации производственных циклов, сокращению эксплуатационных расходов и росту продуктивности добычи. Внедрение информационных систем способствует совершенствованию управления активами и логистическими операциями, усиливая конкурентоспособность предприятий на международной арене.

Использование цифровых решений также способно уменьшить негативное влияние отрасли на экологию. Усовершенствованные методы добычи и транспортировки углеводородов снижают объем выбросов CO<sub>2</sub>, а системы экологического мониторинга помогают предотвращать аварии с серьезными последствиями для природы.

Тем не менее, цифровизация сопровождается рядом сложностей, включая риски кибербезопасности, необходимость крупных финансовых вложений, а также адаптацию кадров к новым рабочим процессам.

В перспективе развитие ИТ будет направлено на комбинирование инновационных технологий, таких как искусственный интеллект, интернет вещей и распределенные реестры, для формирования интегрированных цифровых платформ. Это приведет к созданию автономных систем управления месторождениями, повышению операционной эффективности и уровня безопасности. Кроме того, прогнозируется увеличение спроса на "зеленые" технологии и устойчивые практики, где цифровые инструменты станут важным фактором минимизации экологического ущерба.

В России ведущие нефтегазовые корпорации уже активно используют ИТ-решения, включая проекты "Цифровое

месторождение", "Цифровой завод" и "Цифровая логистика". Данные системы способны увеличить добычу на 5–10% и оптимизировать ключевые бизнес-процессы.

Цифровые платформы превращаются в основной инструмент обработки данных и управления производственными операциями. Они обеспечивают совместимость разнородных систем, гарантируя прозрачность и оперативный доступ к информации для всех участников цепочки.

Концепция "Индустрия 4.0" объединяет передовые технологии, такие как автоматизация, блокчейн и дополненная/виртуальная реальность. Их применение способствует оптимизации процессов разведки и добычи, а также формированию интеллектуальных месторождений. Комбинирование этих технологий в нефтегазовой сфере позволяет добиться значительного роста эффективности и снижения производственных рисков.

Роботизированные системы играют ключевую роль в повышении безопасности и производительности. Они способны выполнять задачи, недоступные для человека, например, диагностику оборудования в экстремальных условиях.

Технологии VR/AR применяются для тренинга сотрудников и симуляции рабочих сценариев. Это улучшает качество обучения и минимизирует вероятность ошибок при выполнении сложных операций.

Генеративный искусственный интеллект обладает значительным потенциалом для российской нефтегазовой индустрии. Его внедрение может повысить производительность и рентабельность, что способно принести дополнительный доход до 343 млрд рублей ежегодно. Однако на текущий момент в отрасли отсутствуют готовые промышленные решения на основе генеративного ИИ.

Данная технология может применяться для разработки прогнозных моделей, помогая компаниям принимать более точные управленческие решения. Кроме того, она способна оптимизировать производственные циклы и сократить издержки.

Проблемы внедрения генеративного ИИ и пути их решения

Одним из ключевых барьеров при внедрении генеративного искусственного интеллекта остается недостаточная технологическая база и дефицит специалистов. Для успешной интеграции этих решений компаниям требуется инвестировать в создание ИИ-инфраструктуры, а также в обучение и переподготовку кадров.

Влияние цифровизации на безопасность в нефтегазовой отрасли

Цифровая трансформация значительно повышает уровень промышленной безопасности за счет следующих технологических решений:

1. Мониторинг оборудования в режиме реального времени

- Промышленный IoT – датчики, установленные на технике, непрерывно передают данные о ее состоянии, что позволяет своевременно выявлять отклонения и переходить от планового ТО к обслуживанию по фактическому состоянию.

- Прогнозирование отказов – алгоритмы машинного обучения анализируют данные сенсоров, предупреждая о возможных поломках и минимизируя риск аварий.

2. Повышение безопасности персонала

- Носимые устройства – смарт-гаджеты с биометрическими датчиками отслеживают состояние работников (пульс, давление, падения), оперативно сигнализируя об опасных ситуациях.

- Контроль доступа – интеллектуальные системы ограничивают вход в опасные зоны, допуская только подготовленных специалистов.

3. Цифровые двойники и симуляция процессов

- Моделирование аварийных сценариев – виртуальные копии производственных объектов позволяют тестировать решения без риска для реального оборудования.

- Оптимизация планирования – цифровые модели помогают выявлять потенциальные угрозы на этапе проектирования работ.

4. VR/AR-технологии в обучении и работе

- Тренажеры на основе виртуальной реальности – позволяют отрабатывать действия в аварийных ситуациях, снижая вероятность ошибок в реальных условиях.

- AR-подсказки – дополненная реальность помогает сотрудникам быстрее осваивать сложное оборудование.

5. Автоматизация опасных операций

- Роботизированные системы – заменяют людей при выполнении задач в зонах повышенного риска (например, инспекция труднодоступных участков).

- Беспилотные технологии – дроны и автономные машины минимизируют необходимость присутствия персонала в опасных зонах.

Цифровизация нефтегазовой отрасли кардинально меняет подходы к безопасности, позволяя предотвращать аварии за счет предиктивной аналитики, автоматизации и удаленного контроля. Внедрение цифровых двойников, ИИ, IoT и робототехники не только снижает риски, но и повышает общую эффективность производства.

Роль цифровых технологий в развитии отрасли  
Современные ИТ-решения, включая искусственный интеллект, блокчейн и облачные платформы, становятся драйверами роста для нефтегазовых компаний. Они обеспечивают:

- оптимизацию производственных циклов,
- снижение эксплуатационных затрат,
- адаптацию к глобальным вызовам, таким как энергопереход и ужесточение экологических норм.

Интеграция передовых технологий позволяет компаниям укреплять конкурентные позиции и эффективнее управлять ресурсами в условиях динамичного рынка.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина Н.В. Альтернативные энергоносители. – М.: Наука, 2004. – 159 с.
2. Панич А. Альтернативные источники энергии [Электронный ресурс]. <http://www.nestor.minsk.by/sn/2003/21/sn32118.html> (дата обращения 04.04.2025).
3. Куашнинг Фолькер. Системы возобновляемых источников энергии. – Астана: Фолиант, 2013. – 432 с.
4. Германович В., Турилин А. Альтернативные источники энергии и энергосбережение. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы. – СПб.: Наука и Техника, 2014. – 320 с.
5. Возобновляемая энергетика в России [Электронный ресурс]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy\\_in\\_Russia](https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_Russia) (дата обращения 04.04.2025).

УДК 004.3.142.4

**ЗОЛОТОВ Г.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### АЛГОРИТМ РАССЛОЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

*В данной статье рассмотрен алгоритм расслоения многослойной печатной платы (МПП) для обеспечения ее детального анализа и контроля на этапах проектирования и тестирования. Описан принцип декомпозиции структуры платы, а также предложен алгоритм автоматического вычленения слоев и их компонентного анализа. Предложенный алгоритм учитывает особенности современных конструкций МПП, включая наличие межслойных соединений и различных типов проводников, что*

*позволяет повысить точность реконструкции электрических и геометрических параметров слоев.*

Современная электроника стремительно развивается, предъявляя повышенные требования к плотности размещения компонентов, надежности и функциональности электронных устройств. В этой связи особое значение приобретают многослойные печатные платы (МПП), которые выступают базовым конструктивным элементом большинства электронных систем, начиная от бытовой электроники и заканчивая высоконадежными промышленными и военными изделиями.

Многослойная печатная плата представляет собой сложную пространственную структуру, включающую в себя несколько чередующихся слоев проводящего и диэлектрического материалов. Такая конструкция позволяет минимизировать размеры устройств, сократить длину соединительных проводников, повысить электромагнитную совместимость и обеспечить целостность сигналов при высокочастотной передаче данных.

Каждый слой платы выполняет строго определенную функцию: одни служат для передачи сигнальных линий, другие обеспечивают питание или заземление, а промежуточные слои выполняют роль изоляторов и конструктивных связующих. При проектировании и производстве МПП критически важно обеспечить корректное расположение и соединение всех слоев для гарантии электрической и механической целостности изделия.

Процесс анализа структуры многослойной печатной платы имеет прикладное значение для различных задач, включая проверку качества на стадии производства, диагностику при возникновении отказов, реверсивное проектирование, а также обеспечение надежности при сертификации изделий. При этом точное и корректное выделение отдельных слоев является обязательным условием для последующего анализа как топологии соединений, так и конструктивных особенностей.

В условиях роста сложности многослойных конструкций традиционные методы исследования, в том числе механическое сечение или визуальная инспекция, становятся недостаточно эффективными. Для преодоления этих ограничений актуальной задачей является разработка алгоритмических методов расслоения МПП, позволяющих осуществлять декомпозицию структуры платы с сохранением геометрических и электрических характеристик слоев.

В рамках данной статьи представлена алгоритмическая модель расслоения многослойной печатной платы, ориентированная на обработку данных, полученных с помощью неразрушающих методов,

включая промышленную компьютерную томографию. Предложенный подход обеспечивает высокую точность выделения слоев и формирует предпосылки для автоматизации последующего структурного и функционального анализа печатных плат любой сложности. Изучение геометрии и взаимодействия между слоями необходимо как для фаз контроля качества готовой продукции, так и при обратной разработке (реверс-инжиниринге) и при расследовании отказов сложных электронных систем.

#### *Анализ существующих подходов*

Исследование печатных плат представляет собой задачу высокой сложности, выделяемую в первую очередь на необходимость точного воспроизведения слоев для контроля и диагностики. Традиционно для расслоения используются механические и оптические методы, однако они имеют ряд существенных ограничений, включая невысокую точность, риск повреждения компонентов и зависимость от качества оборудования.

К числу классических подходов можно отнести микрошлифование, при котором слои платы последовательно вскрываются с помощью абразивных инструментов, а изображения промежуточных сечений анализируются оптическими методами. Данный метод трудоемок и требует высокой квалификации оператора. Кроме того, неконтролируемое истирание слоев приводит к потере информации о топологии соединений.

Современные неразрушающие методы включают использование томографического сканирования, рентгенографического анализа и методов компьютерного зрения на основе обратной реконструкции. Однако большинство из этих решений фокусируются на идентификации дефектов или геометрических особенностей, в то время как задача системного выделения и классификации слоев решается лишь частично.

#### *Алгоритмическая реализация метода*

Предлагаемый алгоритм расслоения ориентирован на автоматизацию процесса декомпозиции многослойной структуры с использованием цифровых моделей, полученных в ходе сканирования платы, например, при помощи промышленного компьютерного томографа. На вход алгоритма подается трехмерная модель объекта, содержащая массив точек (вокселей) с метками плотности и отражающими электромагнитные характеристики материала.

Таблица 1 – Этапы алгоритма

Этап алгоритма	Описание процедуры
Предобработка данных	Очистка облака точек от шумов, медианное сглаживание.
Выделение границ слоев	Градиентная детекция, построение моделей плоскостей.
Кластеризация компонент	Разделение элементов на слои, использование DBSCAN.
Построение модели слоев	Воссоздание геометрии слоя, сопоставление топологии.

Ключевая особенность предлагаемого алгоритма заключается в комплексной обработке пространственных и физических данных о структуре МПП. На этапе выделения границ используется многомерная градиентная оценка, позволяющая с высокой точностью определять переходы между слоями материалов с различной плотностью. Дополнительно для учета изгибов и неровностей платы применяется адаптивное выравнивание с использованием метода наименьших квадратов.

После локализации границ слоев система переходит к фазе кластеризации, где компоненты схемы группируются на основании их положения относительно ранее определенных плоскостей. Такой подход обеспечивает достоверное разделение даже в случае сложной топологии соединений и наличия встраиваемых элементов.

Финальным этапом является формирование виртуальной модели каждого слоя, что позволяет проводить дальнейший автоматизированный анализ схемной топологии, выявлять нарушения проектных правил и восстанавливать электрические цепи для их проверки.

Разработка и внедрение алгоритма расслоения многослойной печатной платы позволяет значительно повысить точность анализа внутренних конструктивных особенностей электронных устройств без физического разрушения изделия. Представленный метод опирается на комбинацию компьютерного зрения, методов машинного обучения и математического моделирования, что обеспечивает его универсальность и возможность интеграции в системы промышленной диагностики.

В отличие от традиционных механических и оптических подходов, предложенный алгоритм позволяет эффективно обрабатывать данные с высоким уровнем шума, корректно определять слои в присутствии сложной геометрии и деформаций, а также



автоматизировать процесс построения структурной модели платы для последующего функционального анализа.

Таким образом, данный алгоритм является важным шагом на пути создания полноценных автоматизированных систем контроля качества и реверсивного проектирования электронных компонентов. Его использование позволяет сократить время на диагностику, повысить точность выявления конструктивных дефектов и снизить вероятность ошибок на этапах верификации и тестирования. В перспективе методика может быть расширена для работы с гибридными структурами и многослойными модулями, применяемыми в системах высокой плотности монтажа.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов, А.В. Технология производства многослойных печатных плат. – М.: РадиоСофт, 2019. – 320 с.
2. Zhang, X., Li, J., & Wang, P. Automated Layer Extraction for Multi-Layer PCBs Using CT Imaging and Machine Learning. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022.
3. Lee, S. et al. Nondestructive Analysis of PCBs Using High-Resolution X-ray Tomography. Microelectronics Reliability, Volume 101, 2019, 113467.
4. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006.
5. Григорьев, А.А., Захаров, И.И. Методы реверсивного инжиниринга электронных устройств. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 412 с.

УДК 004.421

**ЗОЛОТОВ Г.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### ТРАССИРОВКА МЕТОДОМ ВСТРЕЧНОЙ ВОЛНЫ

*В статье рассматривается применение метода встречной волны для решения задачи трассировки соединений в электронно-вычислительных системах. Представлен анализ существующих подходов и предложен новый метод оптимизации трассировки на основе алгоритмов поиска пути. Описаны преимущества использования метода встречной волны по сравнению с традиционными алгоритмами трассировки, а также приведены практические примеры с результатами экспериментов. Показано, что*

*применение данного метода позволяет значительно улучшить качество трассировки и сократить время выполнения.*

Современное проектирование электронно-вычислительных систем невозможно без эффективных методов автоматизации, одним из ключевых этапов которой является трассировка соединений. Этот процесс играет критическую роль в обеспечении корректной работы устройства. С увеличением сложности схем, ростом числа элементов и плотности размещения задача трассировки становится всё более ресурсоёмкой и трудоемкой. Традиционные методы, такие как алгоритм Ли, A\*, жадные и генетические алгоритмы, хотя и зарекомендовали себя как рабочие инструменты, нередко сталкиваются с ограничениями при решении задач в условиях сложных топологий, плотных зон размещения элементов и при наличии большого числа ограничений по маршрутам. В условиях жестких требований к времени проектирования и необходимости обеспечения высокой эффективности работы устройств всё более актуальным становится поиск новых подходов и алгоритмов, позволяющих сократить время трассировки без потери качества.

Одним из таких подходов является метод встречной волны, который сочетает в себе принципы классических волновых алгоритмов и оптимизации за счет одновременного распространения сигнала от начальной и конечной точек соединения. Такой подход позволяет значительно снизить объем поискового пространства, повысить скорость поиска решения и при этом обеспечить гарантию нахождения оптимального пути.

Традиционные методы трассировки включают:

- Алгоритм Ли – метод поиска пути на сетке, который гарантированно находит кратчайший путь, но требует значительных вычислительных ресурсов для больших схем.

- Алгоритм A\* – эвристический метод, который использует оценку расстояния до цели для ускорения поиска, но зависит от качества эвристики.

- Жадные алгоритмы – быстрые, но не всегда обеспечивают оптимальное решение.

- Генетические алгоритмы – позволяют находить глобальный оптимум, но требуют большого времени вычисления.

Каждый из этих методов имеет свои ограничения, особенно при работе с высокоплотными схемами или при наличии множества препятствий.

Метод встречной волны обладает большей эффективностью ускорения работы по сравнению с традиционными методами

трассировки. Выигрыш во времени пропорционален отношению числа исследуемых ячеек при одновременном распространении волны и при распространении волны из одного источника, при этом отношение исследуемых площадей приблизительно равно 2. Для реальных состояний ДРП выигрыш во времени может отличаться, однако в среднем оценка является объективной. Использование данной идеи незначительно усложняет алгоритм, обеспечивая существенный выигрыш во времени.

Поле распространения волны можно уменьшить, ограничивая его прямоугольником, внутри которого находятся соединяемые выводы. Начальная площадь прямоугольника обычно на 10...20 % больше площади прямоугольника, проходящего через эти выводы. Если соединение найти не удалось, то границы прямоугольника расширяют.

Преимущества данного метода:

- Высокая скорость. Благодаря параллельному поиску от двух точек, метод сокращает время трассировки.
- Гарантированное нахождение кратчайшего пути. При отсутствии ограничений метод всегда находит оптимальное решение.
- Учет препятствий. Метод легко адаптируется для работы с запрещенными зонами и другими ограничениями.
- Масштабируемость. Эффективен как для малых, так и для больших схем.

*Алгоритмическая реализация метода*

```
#include <vector>
#include <queue>
#include <unordered_map>
struct Point { int x, y; };
vector<Point> bidirectionalWave(const Point& start,
const Point& end, const vector<vector<bool>>& grid) {
    queue<Point> q1, q2;
    unordered_map<int, Point> parent1, parent2;
    auto hash = [](const Point& p) { return p.x * 1000
+ p.y; };
    q1.push(start); parent1[hash(start)] = {-1, -1};
    q2.push(end); parent2[hash(end)] = {-1, -1};
    while (!q1.empty() && !q2.empty()) {
        auto expandWave = [&](queue<Point>& q, auto&
parent, auto& otherParent) {
            Point p = q.front(); q.pop();
            for (auto [dx, dy] : vector<pair<int, int>>{{0,1},
{1,0}, {0,-1}, {-1,0}}) {
                Point next{p.x + dx, p.y + dy};
```

```
    if (next.x >= 0 && next.y >= 0 && next.x <
grid.size() && next.y < grid[0].size() &&
!grid[next.x][next.y]) {
    if (otherParent.count(hash(next))) {
        // Построение пути
        vector<Point> path;
        for (Point curr = p; curr.x != -1; curr =
parent[hash(curr)]) path.push_back(curr);
        reverse(path.begin(), path.end());
        for (Point curr = next; curr.x != -1; curr =
otherParent[hash(curr)]) path.push_back(curr);
        return path; }
    if (!parent.count(hash(next))) {
        parent[hash(next)] = p;
        q.push(next); } } }
return vector<Point>{}; };
if (auto path = expandWave(q1, parent1, parent2);
!path.empty()) return path;
if (auto path = expandWave(q2, parent2, parent1);
!path.empty()) return path; }
return {}; }
```

Метод встречной волны демонстрирует высокую эффективность при решении задач трассировки соединений в электронно-вычислительных системах. Его преимущества включают высокую скорость работы, гарантированное нахождение кратчайшего пути и возможность учета сложных ограничений в топологии схем. Благодаря одновременному распространению волны от исходной и конечной точек метод существенно сокращает количество проверяемых ячеек и, как следствие, снижает время выполнения вычислений.

Рассмотренный подход позволяет не только решать задачи в ограниченных пространствах с высокой плотностью препятствий, но и успешно масштабируется для использования в больших и сложных проектах. Гибкость алгоритма позволяет эффективно интегрировать его в существующие системы автоматизированного проектирования (САПР), где критически важна производительность и надежность трассировки соединений.

Экспериментальные результаты подтверждают, что предложенный метод способен обеспечить значительное сокращение времени поиска при сохранении точности, что делает его перспективным для применения в реальных инженерных задачах. Кроме того, универсальность идеи встречной волны открывает возможности для дальнейшей оптимизации, включая применение в

многослойных структурах и адаптацию к специфике различных архитектур вычислительных систем.

Таким образом, метод встречной волны представляет собой важный шаг в направлении повышения эффективности автоматизированного проектирования и может быть рекомендован для использования в задачах трассировки, где требуется сочетание скорости, качества и надежности маршрутизации.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Зыков А.Г., Поляков В.И. Алгоритмы конструкторского проектирования ЭВМ. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 136.

2. Листопад Н. И., Карук И. А., Хайдер А. А. Алгоритмы поиска кратчайшего пути и их модификация. Цифровая трансформация, (1), 48-63, 2016.

УДК 004.052

### **КАСТЕРИНА Е.А., СЕРЕБРЯКОВА С.С.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **НАДЕЖНОСТЬ И ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

*Рассматриваются основные аспекты надежности и тестирования электронных средств в экстремальных условиях, а также методы и подходы, которые используются для обеспечения их устойчивости к внешним воздействиям*

Современные электронные средства (ЭС) играют важную роль во многих отраслях, таких как энергетика, космонавтика, авиация, автомобильная промышленность и военная техника и многие другие. Однако эксплуатация ЭС довольно часто происходит в экстремальных условиях (например, вибрации и удары, разный диапазон температур, повышенная влажность, радиационное воздействие и другие агрессивные факторы, влияющие на работоспособность прибора). В таких условиях надежность электронных средств становится критически важной, потому что отказ работы прибора может привести к серьезным последствиям, включая аварии, которые могут привести, в первую очередь, к угрозе жизни людей.

Надежность - это свойство устройства выполнять требуемые функции в заданных условиях в течение определенного времени.

Надежность электронных средств можно описать через:

1) Вероятность безотказной работы  $P(t)$ :

$P(t) = e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  – интенсивность отказов,  $t$  – время.

2) Коэффициент готовности  $K_g$ :

$K_g = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{восст}}}$ , где  $T_{\text{раб}}$  – время работы,  $T_{\text{восст}}$  – время восстановления.

3) Среднюю наработку на отказ  $MTBF$ :

$MTBF = \frac{1}{\lambda}$ , где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Для ЭС надежность включает в себя несколько аспектов. Такими аспектами могут являться ремонтпригодность (возможность быстрого и эффективного восстановления работоспособности после отказа); безотказность (способность устройства работать без сбоев в течение заданного времени); сохраняемость (способность устройства сохранять свои свойства в течение длительного времени, даже при отсутствии эксплуатации); долговечность (способность сохранять работоспособность до наступления предельного состояния).

В экстремальных условиях данные характеристики часто подвергаются серьезным испытаниям, поэтому требуется особый подход к проектированию, производству и тестированию ЭС.

Экстремальные условия могут включать в себя различные комбинации физических, химических и механических воздействий. Основными факторами, влияющими на надежность электронных средств, являются:

1) Температурные воздействия

Высокие температуры могут способствовать перегреву компонентов. При высоких температурах системы охлаждения (радиаторы и вентиляторы) могут не справляться с отводом тепла, что приводит к перегреву. Это впоследствии приводит к ускоренному старению материалов, нарушению паяных соединений и деградации полупроводниковых элементов. Низкие температуры могут способствовать снижению емкости батареи, снижению проводимости, замедлению работы, замерзанию электролитов, могут приводить к хрупкости материалов.

Тепловое расширение материалов:

$$\Delta L = L_0 \times \alpha \times \Delta T,$$

где  $\Delta L$  – изменение длины,  $L_0$  – исходная длина,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения,  $\Delta T$  – перепад температур.

При высоких температурах методами защиты от температурных воздействий являются: теплоотвод (использование радиаторов и вентиляторов для отвода тепла) или пассивное охлаждение (использование материалов, которые обладают высокой

теплопроводностью). При низких температурах: подогрев (установка каких-либо нагревательных элементов для поддержания нужной температуры), термоизоляция (использование теплоизоляционных материалов для защиты компонентов от холода) или правильный выбор компонентов (выбор тех компонентов, которые могут исправно работать при низких температурах).

Для оценки теплоотвода можно воспользоваться законом охлаждения Ньютона:

$$Q = h \times A \times (T_{уст} - T_{сред}),$$

где  $Q$  – тепловой поток,  $h$  – коэффициент теплопередачи,  $A$  – площадь поверхности,  $T_{уст}$  и  $T_{сред}$  – температуры устройства и среды.

## 2) Влажность и коррозия

Влажность и коррозия являются одними из наиболее агрессивных факторов, которые влияют на надежность и срок службы электронных средств.

Повышенная влажность может привести к образованию конденсата. Конденсат в свою очередь может привести к коротким замыканиям, нарушению изоляции или к окислению металлических поверхностей.

Повышенная влажность может также привести к образованию коррозии. Коррозия – это процесс разрушения металлов под воздействиями окружающей среды. Солевой туман ускоряет коррозию и разрушение материалов.

Скорость коррозии:

$$R_{корр} = k \times e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

где  $k$  – константа,  $E_a$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура.

## 3) Вибрации и удары

Вибрации и удары – это механические воздействия, которые могут серьезно повлиять на надежность и работоспособность ЭС.

Вибрации могут вызывать механические повреждения компонентов, трещины в корпусах, ослабление соединений и нарушение целостности печатных плат. Частые вибрации приводят к ускоренному износу механических и электронных компонентов, также вибрации могут приводить к временным сбоям в работе прибора (например, прерывание сигналов).

Резонансная частота конструкции:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где  $k$  – жесткость системы,  $m$  – масса.

Удары могут привести к мгновенному повреждению хрупких элементов (например, могут вызвать сколы, трещины и другие деформации компонентов и корпусов). Резкие удары могут привести, например, к отрыву компонентов от печатных плат.

Ударное ускорение:

$$a = \frac{F}{m},$$

где  $F$  – сила удара.

#### 4) Радиационное воздействие

Радиационное воздействие на электронные средства (компоненты, устройства и системы) может приводить к различным негативным последствиям, особенно в условиях повышенного уровня радиации, таких как космическое пространство, зоны ядерных взрывов или аварий на атомных электростанциях. Это воздействие может быть временным или постоянным, в зависимости от типа радиации, дозы и характеристик электронных компонентов.

Пробой диэлектрика под радиацией:

$$V_{6д} = V_0 \times e^{-\gamma D},$$

где  $V_0$  – начальное напряжение пробоя,  $\gamma$  – коэффициент деградации.

Существует несколько видов радиационного воздействия: ионизирующая радиация (вызывает накопление заряда в диэлектриках, приводя к пробоям) и нейтронное излучение (вызывает смещение атомов в кристаллической решетке, что ведет к дефектам и изменению характеристик полупроводников).

Накопленная доза:

$$D = \int \Phi(E) \times \sigma(E) dE,$$

где  $\Phi(E)$  – поток частиц с энергией  $E$ ,  $\sigma(E)$  – сечение взаимодействия.

#### 5) Химические воздействия

Химические воздействия на электронные средства (компоненты, устройства и системы) могут приводить к повреждению приборов, снижению производительности или полному выходу из строя. Данные воздействия могут быть вызваны различными факторами, такими как коррозия, окисление, загрязнение химическими веществами и воздействие агрессивных сред. В зависимости от условий эксплуатации электронные устройства могут подвергаться различным химическим угрозам.

Для того, чтобы обеспечить надежность электронных средств в экстремальных условиях нужно применять различные методы на этапах проектирования, производства и тестирования. Далее



рассмотрим подробнее каждый из этих этапов и методы, которые нужно использовать для обеспечения надежности ЭС.

Первым этапом выполняется проектирование. Здесь закладывается надежность ЭС, так как этот этап является ключевым, на котором определяются основные характеристики устройства, его устойчивость к внешним воздействиям и способность работать без отказов в течение всего срока службы.

Методами, которые применяются для обеспечения надежности ЭС, являются: выбор компонентов и материалов (нужно выбирать качественные компоненты, которые будут устойчивы к высоким или низким температурам); тепловое проектирование (нужно использовать теплоотвод и минимизировать тепловое взаимодействие между компонентами); схемотехнические решения (при проектировании электронных средств можно использовать стабилизаторы напряжения, введение предохранителей, TVS-диодов, варисторов для защиты от скачков напряжения и тока) и защита от внешних воздействий (можно использовать экранирование, нанесение защитных покрытий, использование герметичных корпусов и компаундов для защиты от агрессивных сред).

Вторым этапом является производство. Надежность электронных средств на данном этапе обеспечивается за счет строгого контроля качества, соблюдения технологических стандартов и применения современных методов сборки и тестирования.

Производственный этап играет ключевую роль в реализации проектных решений и минимизации дефектов, которые могут привести к отказам в процессе эксплуатации. На производственном этапе происходит контроль качества. Здесь строгий контроль на всех этапах производства для исключения дефектов, сочетание различных методов проверки, фиксация всех результатов проверки, предупреждение о дефектах. На производственном этапе используют качественные паяные соединения и монтажные технологии для надежной фиксации.

Здесь также происходит тестирование на этапе производства, т.е. проведение предварительных испытаний для выявления потенциальных слабых мест.

На заключительном этапе происходит тестирование ЭС в экстремальных условиях. Данный этап является ключевым этапом для оценки надежности электронных средств, так как оно направлено на выявление дефектов, проверку функциональности и соответствия техническим требованиям перед выпуском продукции, также

позволяет выявить слабые места и проверить устойчивость устройств к различным воздействиям.

На этапе тестирования можно выявить следующие виды тестирования: вибрационные испытания (проверка устойчивости к вибрациям и ударам); температурные испытания (проверка работы устройства при экстремально высоких и низких температурах); радиационные испытания (воздействие ионизирующего излучения для оценки радиационной стойкости); химические испытания. (проверка устойчивости к агрессивным химическим средам) и испытания на влажность (воздействие повышенной влажности для оценки устойчивости к коррозии и конденсации).

Методами тестирования могут являться: ускоренные испытания (испытания проводятся в условиях, превышающих нормальные, для того, чтобы в ускоренном режиме выявить дефекты); циклические испытания (многократное воздействие различных факторов для оценки долговечности) и реальные испытания (проведение испытаний в условиях, которые максимально приближенные к реальным).

Ускоренные испытания (модель Аррениуса):

$$L_{исп} = L_{эксп} \times e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{исп}} - \frac{1}{T_{эксп}} \right)},$$

где  $T_{исп}$  и  $T_{эксп}$  – температуры испытаний и эксплуатации.

Далее будет применено оборудование, которое можно использовать для тестирования:

1) Климатические камеры. Они используются для тестирования электронных устройств в экстремальных условиях, включая перепады температуры (от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ ), влажность (5–98%), термоудары и циклические нагрузки, помогают выявлять дефекты, которые связаны с расширением материалов, конденсацией, коррозией и термической усталостью, обеспечивая соответствие стандартам (MIL-STD, IEC, ГОСТ). Такие камеры применяются в аэрокосмической, военной и потребительской электронике для повышения надежности изделий.

2) Радиационные камеры предназначены для тестирования электронных компонентов и систем на устойчивость к ионизирующему излучению. Они используются в аэрокосмической, медицинской (рентген-аппараты), ядерной и военной отраслях для проверки работоспособности оборудования в условиях радиации, оценки эффектов накопленной дозы (TID), единичных сбоев (SEU) и деградации материалов, обеспечивая соответствие стандартам (MIL-STD-883, ESA SCC).

3) Химические камеры (коррозионные, солевые, газовые) предназначены для тестирования электроники и материалов на устойчивость к агрессивным средам - соляному туману, газам ( $\text{H}_2\text{S}$ ,

SO<sub>2</sub>), химическим реагентам и влажности. Они выявляют коррозию, окисление контактов и деградацию покрытий, применяясь в авиации, морской и промышленной электронике для проверки долговечности изделий в экстремальных условиях.

4) Вибрационные стенды используются для тестирования электронных устройств и механических компонентов на устойчивость к вибрациям, ударным нагрузкам и резонансным частотам, имитируя условия транспортировки, эксплуатации или сейсмические воздействия для того, чтобы выявить причины разрушений приборов. Они помогают выявлять дефекты пайки, ослабление креплений и структурные повреждения.

Далее последует несколько примеров применения:

1) Космическая отрасль.

В данной отрасли электронные компоненты и системы работают в экстремальных условиях, включая такие условия как: радиация (космические лучи, солнечные частицы, радиационные пояса Земли), приводящая к накоплению дозы (TID), единичным сбоям (SEU) и повреждению кристаллов микросхем; широкий температурный диапазон (от -150°C в тени до +150°C на солнце), что требует применения систем терморегулирования (тепловых труб, радиаторов, нагревателей) и материалов с высокой теплопроводностью; вакуум, вызывающий проблемы с теплоотводом) и дегазацией материалов, что может привести к коротким замыканиям; физическая защита (экраны из алюминия, тантала, многослойная изоляция).

Для обеспечения надежности в космической области, применяются: термоциклирование и радиационные испытания на Земле для имитации космических условий (стандарты ESA SCC, MIL-STD-883); радиационно-стойкие компоненты (например, микросхемы на SOI-технологии или с керамическим корпусом); архитектурная устойчивость (дублирование систем, коррекция ошибок ECC, перезагрузка по Watchdog Timer).

2) Автомобильная промышленность

В современном мире в каждом автомобиле присутствуют те или иные электронные средства, поэтому электронные системы (ECU, датчики, инфотейнмент) работают в жестких условиях, таких как: вибрации и удары (от дорожного полотна, работы двигателя) - могут приводить к разрушению пайки и ослаблению контактов; экстремальные температуры (от -40°C зимой до +85°C и выше в подкапотном пространстве) - вызывают тепловое расширение материалов и деградацию компонентов; влага, соль, химические реагенты - провоцируют коррозию и короткие замыкания.

Методы защиты и испытаний в данной отрасли будут являться: конструктивные решения (герметичные корпуса с уплотнителями, платы с защитным покрытием, даропрочные крепления и виброизоляция); испытания на надежность (вибрационные тесты, термоциклирование (от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ ) и коррозионные испытания); терморегулирование (радиаторы и теплопроводящие подложки для мощных компонентов, принудительное охлаждение)

### 3) Военная техника

В настоящее время ЭС широко применяются в данной области. Военная электроника подвергается воздействию жестких эксплуатационных и боевых условий, таких как: экстремальные температуры (от  $-50^{\circ}\text{C}$  в Арктике до  $+70^{\circ}\text{C}$  в пустынях) - вызывают тепловую деформацию и ускоренную деградацию компонентов; высокая влажность, соленая вода, песок, пыль - провоцируют коррозию и замыкания; механические нагрузки (вибрация, удары от взрывов, транспортировки) - могут приводить к разрушению пайки и крепежных элементов; электромагнитные помехи (ЕМР) - угроза для работы микросхем при ядерном взрыве или работе РЛС.

Используются герметичные корпуса, амортизаторы и защитные покрытия.

Примеры применения военной техники: портативные радиостанции, системы наведения ракет, бортовые компьютеры танков.

Надежность электронных средств в экстремальных условиях представляет собой сложную инженерную задачу, требующую системного подхода на всех стадиях - от проектирования и выбора радиационно-стойких компонентов с учетом эффектов старения, до производства с применением защитных покрытий и герметизации, и всестороннего тестирования (климатического, механического, радиационного) по международным стандартам.

Современные технологии, такие как машинное обучение для прогнозирования отказов, квантово-устойчивое шифрование и новые материалы с памятью формы, позволяют создать электронику, работающую в условиях экстремальных температур, вибраций и радиации.

Однако с появлением квантовых вычислений, наноэлектроники и сложных киберфизических систем требования к отказоустойчивости будут ужесточаться, что делает разработку надежных систем критически важным направлением для аэрокосмической, оборонной и критической инфраструктуры, где цена отказа особенно высока.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Гусев В.Г. Защита электронных средств от внешних воздействий. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. - 344 с.
3. Широков В.П. Надежность радиоэлектронной аппаратуры в экстремальных условиях. – М.: Радио и связь, 2003. – 320 с.
4. Крылов В.В. Испытания электронных средств на воздействие внешних факторов. – М.: Радио и связь, 2004. – 296 с.
5. ГОСТ Р 52931-2008 Надежность в технике. Термины и определения.
6. ГОСТ Р 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

УДК 37.014.544.4

**КОРОЛЕВ А.О.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

*Рассматриваются возможности и условия применения 3D-принтеров по технологии послойного наплавления материала в учебном процессе. Разбираются популярные кинематические схемы и прошивка Klipper.*

Современное образование стремится к синтезу теории и практики, где технологии становятся мостом между аудиторными знаниями и реальными инженерными задачами. 3D-печать, превратившаяся из узкоспециализированного инструмента в доступную образовательную технологию, открывает студентам возможность проектировать, тестировать и совершенствовать свои идеи в физическом мире. Особое место в этом процессе занимают принтеры нового поколения. Их высокая скорость, точность и гибкость настройки делают их незаменимыми для подготовки будущих инженеров, конструкторов и исследователей.

Таким образом, основной задачей данной статьи является показать возможности, легкость и доступность технологии 3D-печати для использования в образовательном процессе и дать пошаговый алгоритм обращения с 3D-принтером на базе прошивки Klipper.

Большинство 3D-принтеров производимых с 2024-го года оснащаются кинематикой Core-XY, она представляет собой систему перемещения печатающей головки 3D-принтера, основанная на синхронной работе двух шаговых двигателей, закреплённых на неподвижной раме. Двигатели управляют движением головки через систему перекрещенных ремней, которые образуют геометрическую схему, напоминающую крест. Каждый двигатель отвечает за одну из осей (X или Y), но их совместная работа позволяет точно позиционировать экструдер в любой точке рабочей области. Например, одновременное вращение двигателей в одном направлении смещает головку по оси X, а разнонаправленное вращение — по оси Y. За счет такой синхронизации достигается высокая точность и плавность движения. Кинематическая схема Core-XY изображена на рисунке 1.

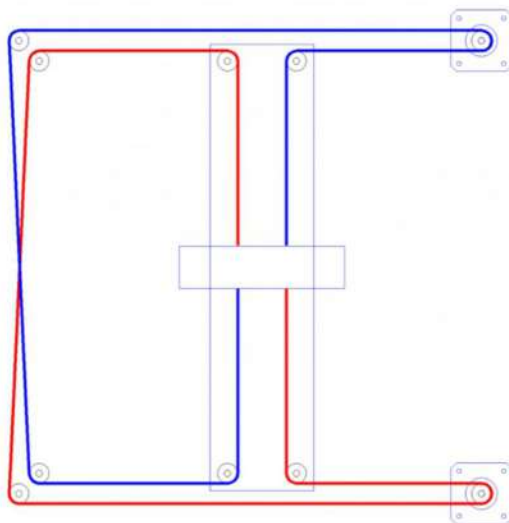


Рисунок 1 – Схема кинематики Core-XY

Основное отличие Core-XY от классических систем заключается в том, что двигатели и часть механизмов остаются статичными, а перемещается только лёгкая каретка с экструдером. Это снижает инерцию и вибрации, что особенно важно при высокоскоростной печати. Ремни, соединяющие двигатели с кареткой, натягиваются под строго выверенными углами, что исключает люфты и обеспечивает повторяемость движений. Сравнение Core-XY с другими подобными кинематиками можно посмотреть в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение кинематик

Параметр	Core-XY	Н-Bot	Ultimaker
Конструкция	Два перекрещенных ремня, двигатели на раме	Один ремень в форме «Н», двигатели на раме	Кольцевые ремни и валы, параллельные каретки
Скорость	До 600 мм/с	До 200 мм/с	До 300 мм/с
Сложность	Требует точного натяжения ремней и квадратности рамы	Нужны качественные направляющие	Нужны качественные направляющие
Преимущества	Скорость, стабильность, компактность	Простота	Точность
Недостатки	Нужно калибровать	Возможны перекосы	Высокая стоимость

Также стоит отметить, что большинство современных принтеров оснащены прошивкой Klipper, она переносит основные вычисления с микроконтроллера принтера на одноплатный компьютер. Это позволяет использовать даже слабые 8-битные платы для высокоскоростной печати, так как сложные алгоритмы обработки шагов двигателей, компенсации вибраций и управления температурой выполняются на более мощном процессоре. Вместо того чтобы нагружать встроенный контроллер, Klipper отправляет ему заранее рассчитанные команды, что значительно повышает точность и скорость.

Главное преимущество Klipper — гибкость. Все настройки хранятся в простых текстовых файлах (например printer.cfg), которые можно редактировать без перепрошивки устройства. Это позволяет быстро экспериментировать с параметрами: регулировать ускорение, настраивать автоматическую калибровку стола или создавать макросы для сложных задач (например, очистки сопла перед началом печати). Кроме того, Klipper поддерживает функции вроде Input Shaping (подавление вибраций) и Pressure Advance (компенсация давления филамента), которые критичны для качественной печати на высоких скоростях.

Очень важная вещь, за которую пользователи любят Klipper — возможность удаленного доступа к 3D-принтеру. Для этого на

одноплатный компьютер устанавливается Moonraker, выполняющий роль сервера, и Mainsail, выполняющий роль визуального пользовательского интерфейса принтера (UI). Для подключения к нему достаточно знать IP-адрес 3D-принтера в сети, а осуществляется оно через браузер, либо через ПО для подготовки G-кода (слайсер).

Хорошим примером слайсера является OrcaSlicer, содержащий в себе шаблоны и пресеты под большинство известных 3D-принтеров и распространяемый через GitHub. Имеет удобный визуальный интерфейс и широкие возможности по подготовке модели, а также способен подключаться к одному или нескольким 3D-принтерам в соответствующей вкладке. Помимо возможностей присущих большинству других слайсеров, OrcaSlicer способен превратить любой 3D-принтер в мультиматериальный при должной настройке G-кода, либо работать с уже подготовленными к такой печати устройствами.

Теперь, когда есть понимание, как Core-XY, Klipper и OrcaSlicer взаимодействуют для достижения точности и скорости, остаётся воплотить теорию в практику. Ниже представлен пошаговый алгоритм работы со среднестатистическим 3D-принтером — от включения принтера до снятия готовой модели. Эта инструкция объединяет все рассмотренные элементы: использование веб-интерфейса Mainsail для удалённого управления, интеграцию со слайсером для подготовки моделей и особенности кинематики Core-XY, обеспечивающей стабильность печати.

Пошаговый процесс обращения с 3D-принтером:

1. Включите принтер, убедитесь, что он подключен к локальной сети. В его настройках можно найти IP-адрес, по которому он подключен.

2. Проверьте состояние принтера.

2.1. Убедиться в том, что сопло и стол чистые, при необходимости протереть изопропиловым спиртом.

2.2. Проверить наличие пластика в подающем механизме.

2.3. Нанесите адгезив на область печати принтера.

3. Подготовьте модель к нарезке.

3.1. Откройте OrcaSlicer и выберите нужный профиль принтера. Убедитесь, что на вкладке “Принтер” есть подключение и отображается визуальный интерфейс.

3.2. Загрузите в слайсер нужную вам модель в формате .stl или .step.

3.3. Выберите материал печати. В случае открытых принтеров можно использовать PLA, TPU и PETG, в случае закрытых к этому списку добавляются инженерные пластики, к примеру ABS.



3.4. При необходимости добавьте поддержки к модели в соответствующей вкладке.

4. Нарезка модели.

4.1. Выбрав подходящие настройки печати нажать кнопку “Нарезать стол”.

4.2. Убедиться, что визуализация слоев соответствует желаемому результату.

4.3. Нажать кнопку “Печать”.

5. Процесс печати.

5.1. Принтер выполнит все предварительные процедуры и калибровки перед печатью.

5.2. Убедитесь, что он выдерживает температуры для заданного ему материала.

5.3. Перед тем как оставить принтер автономно выполнять задание рекомендуется проверить что первый слой модели лег ровно и без отслоений от стола.

5.4. Если модель сломалась во время печати или появились дефекты рекомендуется остановить принтер.

5.5. Для наблюдения за процессом печати можно использовать встроенную в принтер камеру (при наличии).

6. Конец печати.

6.1. После того как принтер закончит работу он будет всё еще слишком нагретый и нужно будет подождать остывания.

6.2. Модель можно снимать при температуре стола ~30-40°C для PLA и ~40-50°C для PETG.

6.3. Чаще всего принтеры оснащаются PEI-пластиной на основе пружинной стали с особым напылением. Для быстрого снятия модели ее можно снять со стола и согнуть.

6.4. Удалите поддержки с модели и отшлифуйте по необходимости.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Welcome to the OrcaSlicer [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/SoftFever/OrcaSlicer/wiki> (дата обращения 04.04.2025).

2. Klipper documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.klipper3d.org> (дата обращения 04.04.2025).

УДК 004.02

**КОСТЯЕВА А.М.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина**ПРИМЕНЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ И ЭВОЛЮЦИОННЫХ  
АЛГОРИТМОВ РАЗМЕЩЕНИЯ**

*Рассматриваются эвристические и эволюционные алгоритмы для решения задач оптимального размещения элементов на печатной плате, включая сравнение эффективности генетического алгоритма и метода обратного размещения на задачах разной размерности. Особое внимание уделяется выбору подхода в зависимости от масштаба задачи и требований к качеству решения.*

Размещение элементов - это процесс, в ходе которого определяются координаты размещения элементов на печатной плате электронного устройства. При размещении элементов необходимо учитывать технологические требования, конструктивные особенности, минимизацию общей длины соединений, тепловые режимы микросхем и целостность питания.

На данный момент существует множество алгоритмов размещения, классификация которых представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация алгоритмов размещения

Существующие методы и алгоритмы для решения задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате можно разделить на две крупные группы: дискретные и непрерывно-дискретные.

Отличительной особенностью класса непрерывно-дискретных методов является размещение элементов на непрерывной плоскости без заранее выделенных установочных позиций. Для данного класса

методов характерно решение задачи в два этапа. На первом этапе происходит поиск экстремума целевой функции, при этом координаты элементов могут иметь различные значения, не привязанные к координатной сетке монтажной плоскости печатной платы. На втором этапе происходит оптимизация полученного размещения путем перемещения элементов в узлы координатной сетки.

Дискретные методы характеризуются начальным определением мест установки элементов на монтажном пространстве печатной платы. Чаще всего в качестве таких мест используются узлы координатной сетки. Для нахождения глобального оптимума необходимо перебрать все возможные варианты размещения элементов, что практически невозможно выполнить при решении реальных задач. Поэтому алгоритмы данного класса обычно направлены на поиск локальных экстремумов целевой функции.

В данной статье мы рассмотрим следующие дискретные алгоритмы размещения: эвристический и эволюционный.

Эвристические алгоритмы не обеспечивают нахождение оптимума целевой функции, однако позволяют находить локальные оптимумы за небольшое время. Этот класс алгоритмов основан на итерационном подходе, при котором значения предыдущей итерации используются для улучшения значения целевой функции на последующих итерациях.

Достоинства: быстрое время решения задач.

Недостатки: в редких случаях приводит к оптимальным результатам.

Эволюционные алгоритмы представляют собой методы оптимизации, основанные на принципах естественного отбора и эволюции. Они моделируют процесс эволюции популяции, где решения подвергаются мутациям, скрещиванию и отбору для нахождения лучшего решения задачи.

Эволюционные алгоритмы характеризуются тем, что они способны исследовать большое пространство поиска решений, что делает их более эффективными для нахождения глобальных оптимумов по сравнению с эвристическими методами. При этом эволюционные алгоритмы могут потребовать больше вычислительных ресурсов и времени для достижения результата.

Достоинства: широкая область применения; пригодность для поиска в сложном пространстве решений большой размерности; отсутствие ограничений на вид целевой функции.

Недостатки: эвристический характер эволюционных вычислений не гарантирует то, что найденное решение будет оптимальным решением; высокая вычислительная трудоемкость.

Рассмотрим данные алгоритмы подробнее на примерах.

#### Метод обратного размещения

В методе обратного размещения осуществляется предварительная оценка каждого из размещаемых элементов  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  и каждой свободной позиции  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ , после чего все элементы размещаются одновременно.

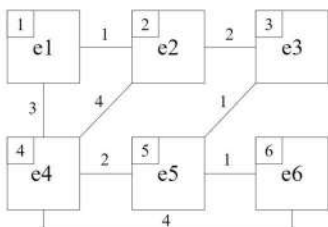


Рисунок 2 – Схема соединений. Начальный вариант размещения

Распишем матрицы С и D:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 4 & 0 & 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Для каждого элемента  $e_i$  по матрице С рассчитывается суммарное число соединений этого элемента с остальными элементами по формуле:

$$c_i = \sum_{j=1}^n c_{ij}$$

$$c_1 = 4; c_2 = 7; c_3 = 3; c_4 = 13; c_5 = 4; c_6 = 5$$

Для каждого посадочного места  $p_i$  по матрице D вычисляется суммарное расстояние этой позиции до всех остальных позициями по формуле:

$$d_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}$$

$$d_1 = 9; d_2 = 7; d_3 = 9; d_4 = 9; d_5 = 7; d_6 = 9$$

Все оценки связанности  $c_{ij}$  упорядочиваются по возрастанию, а оценки длины  $d_{ij}$  – по убыванию.

$$c_{31} = 3; c_{12} = 4; c_{53} = 4; c_{64} = 5; c_{25} = 7; c_{46} = 13$$

$$d_{11} = 9; d_{32} = 9; d_{43} = 9; d_{64} = 9; d_{25} = 7; d_{56} = 7$$

Таким образом, 3-й элемент размещаем в 1-ю позицию, 1-й элемент – в 3-ю позицию, 5-й элемент – в 4-ю позицию, 6-й элемент – в 6-ю позицию, 2-й элемент – во 2-ю позицию, 4-й элемент – в 5-ю позицию. Окончательный вариант размещения представлен на рисунке 3.

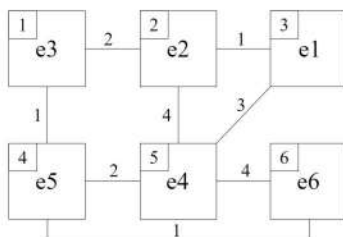


Рисунок 3 – Конечный вариант размещения

Рассчитаем суммарную взвешенную длину межсоединений для начального и конечного вариантов размещения по формуле:

$$L_{\min}(p) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} d_{p(i)p(j)}$$

$$L_{\min \text{ нач}}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 2 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 1 = 27$$

$$L_{\min \text{ кон}}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 2 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 2 = 22$$

Начальная суммарная взвешенная длина связей равна 27, а после завершения работы алгоритма становится равной 22.

#### Генетический алгоритм

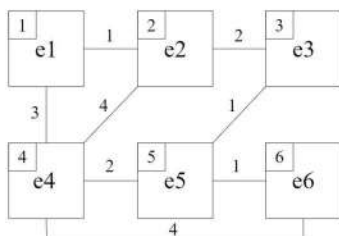


Рисунок 4 – Схема соединений

Рассчитаем суммарную взвешенную длину межсоединений для начального варианта размещения по формуле:

$$L_{\min}(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{p(i)p(j)}$$

$$L_{\min_{нач}}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 2 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 1 = 27$$

$$L_{\min} \in [0; 27]$$

Создаём начальную популяцию из 10 хромосом (возможных решений), где каждая хромосома представляет собой случайное размещение элементов на позициях.

Хромосома 1:  $e_1, e_2, e_3, e_3, e_4, e_6$

Хромосома 2:  $e_4, e_6, e_5, e_3, e_1, e_2$

Хромосома 3:  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_6, e_4$

Хромосома 4:  $e_3, e_6, e_5, e_2, e_1, e_1$

Хромосома 5:  $e_2, e_5, e_6, e_1, e_3, e_4$

Хромосома 6:  $e_3, e_4, e_1, e_6, e_2, e_5$

Хромосома 7:  $e_2, e_1, e_4, e_5, e_6, e_3$

Хромосома 8:  $e_2, e_1, e_5, e_4, e_3, e_6$

Хромосома 9:  $e_5, e_2, e_4, e_3, e_6, e_1$

Хромосома 10:  $e_6, e_2, e_3, e_4, e_1, e_5$

Для каждой хромосомы вычисляем оценку приспособленности (качество каждого решения), которая отражает суммарную взвешенную длину соединений между элементами по формуле:

$$L_{\min}(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{p(i)p(j)}$$

$$L_{\min 1}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 2 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 3 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 2 = 24$$

$$L_{\min 2}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 2 + 2 \times 2 + 4 \times 3 + 1 \times 3 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 1 = 35$$

$$L_{\min 3}(p) = 1 \times 2 + 3 \times 3 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 1 = 27$$

$$L_{\min 4}(p) = 1 \times 2 + 3 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 2 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 1 = 22$$

$$L_{\min 5}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 2 + 2 \times 2 + 4 \times 3 + 1 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 1 = 33$$

$$L_{\min 6}(p) = 1 \times 2 + 3 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 3 + 2 \times 2 + 4 \times 2 + 1 \times 2 = 30$$

$$L_{\min 7}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 1 + 2 \times 3 + 4 \times 2 + 1 \times 2 + 2 \times 3 + 4 \times 2 + 1 \times 1 = 35$$

$$L_{\min 8}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 2 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 2 + 2 \times 3 + 4 \times 2 + 1 \times 1 = 32$$

$$L_{\min 9}(p) = 1 \times 2 + 3 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 2 + 1 \times 2 = 28$$

$$L_{\min 10}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 3 = 26$$

Производим отбор по ранжированию и выбираем значения, попадающие в диапазон  $L_{\min} \in [0; 27]$ .

$$L_{\min 1}(p) = 24; L_{\min 3}(p) = 27; L_{\min 4}(p) = 22; L_{\min 10}(p) = 26$$

Избранные решения (родители) комбинируем для создания новых решений (потомков). Производим двухточечный кроссовер (скрещивание).

Родитель 1 (хромосома 1):  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6$

Родитель 2 (хромосома 3):  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_6, e_4$

Потомок 1:  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_4, e_6$

Потомок 2:  $e_1, e_2, e_3, e_5, e_6, e_4$

Родитель 1 (хромосома 3):  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_6, e_4$

Родитель 2 (хромосома 4):  $e_3, e_6, e_5, e_2, e_4, e_1$

Потомок 1:  $e_1, e_3, e_5, e_2, e_6, e_4$

Потомок 2:  $e_3, e_6, e_2, e_5, e_4, e_1$

Родитель 1 (хромосома 3):  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_6, e_4$

Родитель 2 (хромосома 10):  $e_6, e_2, e_3, e_4, e_1, e_5$

Потомок 1:  $e_1, e_2, e_3, e_5, e_6, e_4$

Потомок 2:  $e_6, e_3, e_2, e_4, e_1, e_5$

Получилось 5 новых решений:

Хромосома 11:  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_4, e_6$

Хромосома 12:  $e_1, e_2, e_3, e_5, e_6, e_4$

Хромосома 13:  $e_1, e_3, e_5, e_2, e_6, e_4$

Хромосома 14:  $e_3, e_6, e_2, e_5, e_4, e_1$

Хромосома 15:  $e_6, e_3, e_2, e_4, e_1, e_5$

Для каждой хромосомы снова вычисляем оценку приспособленности (качество каждого решения), которая отражает суммарную взвешенную длину соединений между элементами по формуле:

$$L_{\min}(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{p(i)p(j)}$$

$$L_{\min 11}(p) = 1 \times 2 + 3 \times 2 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 2 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 2 = 28$$

$$L_{\min 12}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 3 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 3 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 1 = 32$$

$$L_{\min 13}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 3 + 2 \times 2 + 4 \times 2 + 1 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 2 = 31$$

$$L_{\min 14}(p) = 1 \times 1 + 3 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 2 + 1 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 1 + 1 \times 2 = 25$$

$$L_{\min 15}(p) = 1 \times 2 + 3 \times 1 + 2 \times 1 + 4 \times 3 + 1 \times 2 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 3 = 32$$

Производим мутацию. Вводим случайные изменения для 1% потомков, чтобы избежать застревания в локальных оптимумах. Учитывая ограничения, в хромосоме меняем местами два элемента.

Хромосома 11:  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_4, e_6$

Хромосома 16 (хромосома 11 после мутации):  $e_1, e_4, e_2, e_5, e_3, e_6$

Для мутировавшей хромосомы вычисляем оценку приспособленности (качество решения):

$$L_{\min 16}(p) = 1 \times 2 + 3 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 1 + 1 \times 1 + 2 \times 2 + 4 \times 2 + 1 \times 2 = 28$$

Производим отбор. Создаём новую популяцию из 10 хромосом (лучших решений).

Хромосома 1:  $e_1, e_2, e_3, e_3, e_4, e_6$

Хромосома 3:  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_6, e_4$

Хромосома 4:  $e_3, e_6, e_5, e_2, e_4, e_1$

Хромосома 6:  $e_3, e_4, e_1, e_6, e_2, e_5$

Хромосома 9:  $e_5, e_2, e_4, e_3, e_6, e_1$

Хромосома 10:  $e_6, e_2, e_3, e_4, e_1, e_5$

Хромосома 11:  $e_1, e_3, e_2, e_5, e_4, e_6$

Хромосома 14:  $e_3, e_6, e_2, e_5, e_4, e_1$

Хромосома 13:  $e_1, e_3, e_5, e_2, e_6, e_4$

Хромосома 16:  $e_1, e_4, e_2, e_5, e_3, e_6$

Данный алгоритм выполняется до тех пор, пока не будет рассмотрено введённое пользователем количество популяций.

Эвристические и эволюционные алгоритмы нашли широкое применение в задачах оптимального размещения элементов, таких как компоновка электронных компонентов на печатных платах. Эти методы позволяют находить качественные решения за приемлемое время, избегая полного перебора всех возможных вариантов, что делает их незаменимыми инструментами в инженерной практике.

Среди разнообразия подходов к решению задач размещения особого внимания заслуживают генетический алгоритм и метод обратного размещения. Генетический алгоритм, основанный на принципах биологической эволюции, использует механизмы селекции, скрещивания и мутации для поиска оптимальных решений. Этот метод демонстрирует высокую эффективность при работе со сложными



многоэкстремальными задачами, так как способен исследовать обширные области пространства решений и избегать застревания в локальных оптимумах. Однако он требует тщательной настройки параметров и обладает относительно медленной скоростью сходимости на малых объемах данных.

Метод обратного размещения, в свою очередь, работает по принципу итеративного улучшения начального решения, последовательно минимизируя целевую функцию. Этот подход отличается более простой реализацией и настройкой, а также высокой скоростью работы при малых и средних размерах задач. Однако его существенным недостатком является сильная зависимость от начального приближения и склонность к попаданию в локальные оптимумы, что особенно заметно при увеличении размерности задачи.

При выборе между этими двумя методами следует учитывать масштаб решаемой задачи. Для небольших задач, содержащих до 50-100 элементов, предпочтительнее использовать метод обратного размещения, так как он обеспечивает быстрое получение удовлетворительного результата при минимальных вычислительных затратах. В случае же работы с крупномасштабными задачами, включающими сотни и тысячи элементов, генетический алгоритм оказывается более подходящим выбором благодаря своей способности эффективно исследовать обширные пространства решений и находить глобально оптимальные или близкие к ним решения.

На практике часто оказывается эффективным комбинированный подход, при котором начальное решение находится методом обратного размещения, а затем подвергается дооптимизации с использованием генетического алгоритма. Такой гибридный метод позволяет сочетать преимущества обоих подходов - скорость начальной стадии и качество финального решения. В конечном счете, выбор конкретного алгоритма или их комбинации должен осуществляться с учетом специфики решаемой задачи, требований к качеству решения и доступных вычислительных ресурсов.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
2. Сапрыкин А.Н. Алгоритмические методы автоматизации конструирования электронных средств: учебное пособие – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2021. – 116 с.

УДК 004.65

**КУЛАКОВА И.В.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф.Уткина**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*В статье рассматриваются высокоэффективный источник ультрафиолетового излучения, основные проблемы, связанные с созданием высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения, современные разработки.*

Ультрафиолетовое (УФ) излучение обладает уникальными свойствами, которые делают его востребованным в различных областях: от медицины до промышленности. Создание высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения является актуальной задачей для научных и технологических кругов. Рассмотрим следующие источники УФ-излучения:

Ртутные лампы. Преимущества: высокая мощность, широкий спектр излучения. Недостатки: токсичность ртути, низкая энергетическая эффективность, ограниченный срок службы.

Полупроводниковые лазеры. Преимущества: высокая эффективность, малые размеры, возможность регулировки длины волны. Недостатки: сложность производства, ограничения в мощности.

УФ-светодиоды. Преимущества: низкое потребление, малый размер, отсутствие токсичных веществ. Недостатки: необходимость дальнейших исследований для увеличения глубокой УФ-выводимости.

Проблемы при создании высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения.

Создание высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения сопряжено с рядом вызовов и проблем. Основные из них:

**1. Энергетическая эффективность**

Потери энергии при преобразовании электричества в УФ-излучение остаются значительными. Необходимость улучшения эффективности процессов генерации и минимизации потерь важна для достижения конкурентоспособности.

**2. Теплоотвод**

Высокая температура работы источников может привести к перегреву, что негативно сказывается на эффективности и сроке

службы. Разработка эффективных систем охлаждения остается одной из важных задач.

### 3. Экологические аспекты

Использование токсичных материалов, таких как ртуть в ртутных лампах, вызывает опасения относительно безопасности и экологии. Создание безопасных и устойчивых технологий крайне необходимо.

### 4. Сложность производства

Процессы производства современных УФ-источников часто требуют высоких технологий и значительных инвестиций. Сложные процессы могут ограничивать массовое производство и увеличивать конечную стоимость продуктов.

### 5. Ограничения в мощности

Множество новых технологий, таких как УФ-светодиоды и полупроводниковые лазеры, еще недостаточно развиты для работы на высоких мощностях, что ограничивает их применение в определенных областях.

### 6. Радиус действия и направленность

Оптимизация форм и конструкций для достижения широкого радиуса действия и нужной направленности излучения является важной задачей, особенно в медицинских и дезинфекционных применениях.

### 7. Долговечность

Увеличение срока службы источников ультрафиолетового излучения по сравнению с существующими технологиями прямо влияет на эффективность в долгосрочной перспективе и экономические затраты.

Современные разработки.

Современные разработки в области высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения направлены на создание более эффективных, безопасных и долговечных технологий. Вот некоторые из них:

1. **УФ-светодиоды.** Светодиоды, излучающие ультрафиолет, представляют собой перспективную альтернативу традиционным лампам. Они обладают высокой энергоэффективностью, малым размером и продолжительным сроком службы. Разработки в этой области направлены на улучшение выходной мощности и длин волн излучения.

2. **Полупроводниковые лазеры.** Полупроводниковые лазеры нового поколения также используются для генерации УФ-излучения. Эти устройства могут обеспечить высокую мощность и четкую

направленность луча. Их разработка включает улучшение стабильности работы и снижение производственных затрат.

3. Лампы на основе керамики. Керамические лампы являются альтернативой ртутным источникам, так как они минимизируют экологические риски и могут обеспечить высокую эффективность. Технологии, связанные с керамическими лампами, продолжают развиваться, что позволяет улучшать их характеристики.

4. Технологии интенсивного излучения. Используются специальные технологии, такие как излучение через аргоновые и ксеноновые лампы, обеспечивающие высокую интенсивность ультрафиолетового света. Эти технологии находят применение в медицинских и промышленных установках.

5. Наночастицы для генерации УФ-излучения. Исследования показывают, что использование наночастиц может значительно улучшить выход ультрафиолетового света. Это направление открывает возможности для создания новых решений в области катализаторов и сенсоров.

6. Интеллектуальные системы управления. Внедрение умных технологий для регулирования мощности и спектра УФ-излучения позволяет адаптировать источники к конкретным условиям эксплуатации. Это приводит к увеличению гибкости и эффективности применения.

7. Улучшенные показатели безопасности. Современные разработки направлены на создание безопасных источников, которые минимизируют риск воздействия УФ-излучения на человека и экологию. Это включает в себя системы защиты и фильтры для снижения вредного воздействия.

Исследования фокусируются на создании новых материалов и технологий, таких как:

- Гетероструктуры: комбинации различных полупроводников для улучшения генерации и светоотдачи.

- Перовскитные материалы: оказались многообещающими благодаря своей светоотдаче и простоте обработки.

- Квантовые точки: предлагают возможность создания источников с необходимыми характеристиками структуры и эмиссии.

Методы и технологии, используемые в современных разработках, показывают большой потенциал для улучшения эффективности источников ультрафиолетового излучения и расширения их применения в различных сферах, включая медицину, дезинфекцию, вредителей и многое другое.

Решение проблем при создании высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения

Создание высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения связано с рядом сложных задач. Вот некоторые из них и подходы к их решению:

1. Энергетическая эффективность. Низкая энергоэффективность традиционных источников УФ-излучения. Решение: Использование светодиодов и полупроводниковых лазеров, которые имеют значительно меньшие энергозатраты на аналогичную выходную мощность.

2. Температурные режимы. Высокие температуры при работе УФ-источников могут приводить к перегреву и снижению срока службы. Решение: Разработка систем охлаждения и использования материалов с высокой теплопроводностью, которые помогают снижать тепловую нагрузку.

3. Однородность излучения. Проблема: Неровное распределение УФ-излучения может снизить его эффективность. Решение: Оптимизация оптики и геометрии источников для обеспечения равномерного распределения света и использование технологий диффузии.

4. Устойчивость к воздействию окружающей среды. Проблема: Ультрафиолетовое излучение может повреждать компоненты и материалы, влияя на долговечность. Решение: Применение устойчивых к УФ-излучению материалов и защитных покрытий, которые увеличивают срок службы источников.

5. Безопасность использования. Проблема: УФ-излучение может быть опасным для здоровья. Решение: Интеграция систем защиты, таких как автоматические выключатели и индикаторы, которые минимизируют риск воздействия на человека.

6. Экологические аспекты. Проблема: Использование токсичных веществ, таких как ртуть, в традиционных источниках. Решение: переход на экологически чистые технологии, такие как УФ-светодиоды, которые не содержат опасных химических веществ.

7. Снижение производственных затрат. Проблема: Высокие начальные инвестиции при разработке новых технологий. Решение: Исследование новых производственных процессов и материалов, которые помогут сократить расходы и увеличить массовое производство.

8. Увеличение спектра применения. Проблема: Ограниченность в использовании из-за специфических характеристик излучения. Решение: Разработка многофункциональных источников, которые

могут работать в различных диапазонах УФ-излучения, что расширяет их применение.

Эти подходы позволяют преодолеть основные проблемы, возникающие при создании высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения и способствуют дальнейшему развитию технологий в этой области.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галанин Н.Ф. Лучистая энергия и ее гигиеническое значение. – М.: Знание, 1991 – 45 с.
2. Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я. Спектроскопия вакуумного ультрафиолета. – М.: Агропромиздат, 1987. – 52с.
3. Потапченко Н.Г., Савлук О.С. Использование ультрафиолетового излучения в практике обеззараживания воды // Химия и технология воды. – М., 1995. Т. 13. № 12. – С. 41-48.
4. Самойлова К.А. Действие ультрафиолетовой радиации на клетку. – Ленинград.: Интерстиль, 1997 – 106с.
5. Мейер А., Зейтц Э. Ультрафиолетовое излучение. – М.: Наука, 1982.
6. Р 50.2.053-2006 ГСИ. Измерение энергетической освещенности ультрафиолетового излучения в производственных помещениях. Методика выполнения измерений.

УДК 004.65

**ЛАПУТИН А.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБРАБОТКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ

*В статье рассматриваются проблемы обработки данных датчиков в автоматизированных системах управления тепловыми электростанциями (ТЭС). Рассматриваются методы повышения точности данных, предиктивные алгоритмы раннего обнаружения неисправностей, а также роль современных технологий, таких как IoT и SCADA, в оптимизации производства конденсата из дымовых газов.*

Автоматизация технологических процессов на тепловых электростанциях (ТЭС) необходима для повышения эффективности производства, повышения надежности оборудования и снижения эксплуатационных расходов. Одним из ключевых аспектов обеспечения стабильной работы ТЭС является контроль процесса

получения конденсата из дымовых газов. Этот процесс требует постоянного контроля таких параметров, как температура, давление, влажность и состав газа. Для обеспечения надлежащего функционирования системы и своевременного выявления любых проблем необходима точная и надежная система сбора данных. Эта система обеспечивает основу для формирования графиков и отчетов, которые затем анализируются операторами для принятия обоснованных решений.

В последние годы все больше внимания уделяется совершенствованию методов сбора данных и повышению их точности, поскольку ошибки в измерениях могут привести к сбоям в работе системы и снижению эффективности работы станции. Поэтому одной из важнейших задач, с которой сталкиваются ТЭС, является обеспечение высокого качества датчиков и надежности систем передачи и обработки данных.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) основаны на использовании точных датчиков, которые измеряют ключевые параметры работы станции. Эти датчики измеряют такие параметры, как температура, давление, расход и состав газа. Система мониторинга на основе этих датчиков позволяет операторам отслеживать производительность завода в режиме реального времени, предоставляя необходимую информацию для принятия оперативных решений.

Точные измерения имеют решающее значение, поскольку они напрямую влияют на процесс принятия решений относительно регулирования оборудования. Даже небольшие расхождения в данных датчиков могут привести к неправильным действиям оператора, что, в свою очередь, может снизить эффективность завода. В результате повышение точности датчиков и минимизация ошибок данных являются жизненно важной задачей в автоматизации процессов.

Несмотря на достижения в области автоматизации и сенсорных технологий, несколько проблем по-прежнему влияют на качество собираемых данных. Одной из основных проблем является точность самих датчиков. Со временем датчики могут деградировать, терять точность из-за старения или подвергаться воздействию условий окружающей среды. Например, датчики в условиях высокой температуры и высокого давления могут подвергаться износу или деформации, что приводит к неточным данным.

Не все датчики способны к самокалибровке, что усложняет поддержание точности данных. Регулярное обслуживание, калибровка

и диагностика датчиков необходимы для обеспечения надежных показаний, но эти задачи могут быть трудоемкими и дорогостоящими.

Другая проблема связана с передачей данных с датчиков. В реальных условиях помехи сигнала могут исказить передаваемые данные. Для решения этих проблем необходимы системы с высокой надежностью передачи данных и встроенной коррекцией ошибок.

По мере увеличения количества датчиков и сбора большего количества данных обработка этих больших объемов информации в режиме реального времени становится сложной задачей. Для этого требуются мощные вычислительные ресурсы и алгоритмы, способные быстро обрабатывать и анализировать данные.

Для решения проблемы точности данных с датчиков необходимо использовать несколько стратегий и технологий. Во-первых, следует использовать высокоточные датчики, которые могут надежно работать в суровых условиях. Например, современные датчики с возможностями самокалибровки могут значительно повысить точность измерений, датчики с цифровыми выходами помогают уменьшить ошибки при передаче данных.

Повышение точности измерений также подразумевает использование методов фильтрации сигналов. Алгоритмы фильтрации могут удалять шумы и помехи, что помогает повысить надежность данных. Такие алгоритмы, как фильтры Калмана [1], часто используются для обработки зашумленных и неполных данных, что делает измерения более точными.

Еще одной важной мерой является внедрение диагностических систем, которые могут обнаруживать проблемы с датчиками на ранней стадии. Выявляя проблемы до того, как они вызовут значительные сбои, эти системы помогают предотвратить неточные данные и сбои системы.

После того, как данные собраны, их необходимо обработать, проанализировать и визуализировать. Однако проблема обработки больших объемов данных в режиме реального времени сохраняется, особенно с учетом растущего числа датчиков на ТЭС. Растущий объем данных требует расширенных возможностей обработки.

Для эффективной обработки этих данных необходимы мощные серверы и специализированное программное обеспечение. Программное обеспечение должно не только собирать и хранить данные, но и анализировать их, создавать графики и создавать отчеты, которые могут использоваться операторами для принятия решений.

Анализ данных может быть улучшен за счет использования предиктивных алгоритмов, которые помогают выявлять отклонения от



нормальных значений до того, как они станут серьезными проблемами. Это позволяет операторам принимать упреждающие меры и обеспечивать бесперебойную работу завода.

Предиктивные алгоритмы позволяют анализировать исторические данные с датчиков и предсказывать поведение системы в будущем. В контексте автоматизированной системы управления процессом производства конденсата из дымовых газов на ТЭС такие алгоритмы помогают выявлять аномалии, предсказывать возможные сбои и оптимизировать параметры работы [2].

Многие современные ТЭС интегрируют автоматизированные системы, объединяющие различные технологии, такие как системы SCADA, для мониторинга и управления оборудованием. В этих системах данные с датчиков передаются в центральную базу данных, где они обрабатываются и анализируются. На основе этих данных формируются графики и отчеты, которые помогают корректировать производительность завода по мере необходимости.

Для передачи данных с датчиков все чаще используется беспроводная технология. Это повышает гибкость системы, снижает стоимость прокладки кабелей и упрощает добавление новых датчиков в систему.

В последнее время на ТЭС применяется «Интернет вещей» (IoT) для создания взаимосвязанной сети датчиков и систем. Эта технология обеспечивает лучшую связь между подсистемами и помогает повысить точность данных.

Также разрабатываются усовершенствованные алгоритмы для эффективной обработки данных датчиков. Эти алгоритмы не только фильтруют и обрабатывают данные, но и делают прогнозы о возможных отклонениях. Использование моделей машинного обучения повышает точность этих прогнозов, помогая системе обнаруживать проблемы до того, как они повлияют на работу.

Программное обеспечение, используемое для визуализации данных, должно быть простым в использовании и интуитивно понятным. Современные системы предоставляют разнообразные графические инструменты для отслеживания изменений параметров в режиме реального времени и помогают операторам эффективно контролировать производительность завода.

Важным аспектом современной автоматизации является интеграция системы управления с другими подсистемами ТЭС, такими как системы безопасности и аварийного оповещения. Такая интеграция обеспечивает более эффективное управление процессами завода и позволяет быстро реагировать на потенциальные проблемы.

Для этого крайне важно использовать стандартизированные протоколы для обмена данными между подсистемами.

Автоматизация процессов на ТЭС имеет несколько явных преимуществ. Во-первых, она повышает точность и надежность данных, что приводит к более эффективному принятию решений. Во-вторых, автоматизация снижает человеческие ошибки, делая систему более согласованной. В-третьих, она повышает эффективность оборудования и помогает снизить эксплуатационные расходы.

Однако автоматизация также имеет свои проблемы. Первоначальная стоимость внедрения таких систем может быть высокой, и для поддержания бесперебойной работы систем требуется постоянное обслуживание и обновления. Если система выйдет из строя, существует риск эксплуатации завода с неверными данными, что может привести к авариям.

В целом точность и надежность данных датчиков на ТЭС имеют решающее значение для обеспечения стабильной работы станции. Современные технологии, такие как высокоточные датчики, алгоритмы фильтрации и диагностические системы, а также интеграция с другими подсистемами, могут значительно повысить производительность системы. Однако для того, чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами автоматизации, необходимо решить технические, финансовые и организационные проблемы, чтобы обеспечить работу ТЭС с максимальной эффективностью.

Многие современные ТЭС интегрируют автоматизированные системы, объединяющие различные технологии, такие как системы SCADA, для мониторинга и управления оборудованием. В этих системах данные с датчиков передаются в центральную базу данных, где они обрабатываются и анализируются. На основе этих данных формируются графики и отчеты, которые помогают корректировать производительность завода по мере необходимости.

Для передачи данных с датчиков все чаще используется беспроводная технология. Это повышает гибкость системы, снижает стоимость прокладки кабелей и упрощает добавление новых датчиков в систему.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Шахтарин Б.И., Фильтры Винера и Калмана. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 408с.
2. Рафгарден Т., Совершенный алгоритм. Основы. – Питер, 2023. – 256с.

УДК 004.932

**ЛАХМЫТКИН Н.Д.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ПОИСК И УСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ  
НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

*В статье рассматриваются методы поиска импульсных помех на спутниковых изображениях. Проанализированы существующие подходы, разработан новый алгоритм, который позволяет эффективно выявлять и устранять импульсные помехи, минимизируя искажения полезной информации.*

*Введение*

Спутниковые изображения имеют огромное значение для анализа состояния Земли и различных природных процессов. Однако качество изображений часто снижается из-за различных видов помех, среди которых импульсные помехи оказывают значительное влияние. Эти помехи могут быть вызваны сбоем в работе сенсоров, электромагнитными помехами или космическими частицами. Их наличие ухудшает визуальное восприятие изображений и снижает точность последующего анализа данных. Целью настоящего исследования является разработка алгоритма поиска и устранения импульсных помех, который будет более эффективным и точным по сравнению с существующими, такими как медианная фильтрация и адаптивные фильтры.

*Обзор методов обнаружения и устранения помех*

Медианная фильтрация - один из наиболее популярных методов, применяемых для устранения импульсных помех типа "соль и перец". Такой фильтр заменяет значение каждого пикселя на медианное значение пикселей в его окрестности. Несмотря на свою простоту, медианный фильтр может привести к размытию деталей изображения, что ограничивает его применение в сложных случаях [1].

Адаптивные фильтры автоматически подстраиваются под характеристики локальной области изображения. Адаптивный медианный и винеровский фильтры являются наиболее известными методами. Однако они требуют значительных вычислительных ресурсов и могут быть менее эффективными при высокой плотности помех [2].

Вейвлет-анализ позволяет выделить и удалить импульсные помехи, анализируя изображение на разных частотных уровнях. Этот

метод хорошо сохраняет детали изображения, но требует значительных вычислительных мощностей [3].

Методы на основе нейронных сетей используют обучение на больших наборах данных для предсказания «чистых» изображений. Этот подход показал хорошие результаты, но также требует большого объема данных и вычислительных мощностей.

#### *Разработка нового подхода к поиску импульсных помех*

Основываясь на анализе существующих методов и выявленных их недостатках, предлагается новый подход к решению проблемы. Он направлен на повышение точности обнаружения импульсных помех, сохранение полезной информации на изображении и снижение вычислительных затрат.

Разработанный алгоритм сочетает в себе элементы адаптивной фильтрации и статистического анализа, что позволяет эффективно справляться с различными типами импульсных помех, минимизируя при этом размытие деталей изображения. В основе алгоритма лежит принцип локального анализа характеристик пикселей, позволяющий определить, является ли пиксель частью импульсной помехи или принадлежит полезному сигналу. Основная идея заключается в адаптивной коррекции пороговых значений для фильтрации помех на основе локальной дисперсии, что позволяет более эффективно выделять пиксели, пораженные шумом, сохраняя при этом детали изображения [4].

#### *Описание алгоритма*

Алгоритм можно представить в виде последовательности следующих шагов:

1. Предварительная обработка изображения (при необходимости):

- коррекция яркости или контрастности, для улучшения качества исходных данных и стабилизации работы алгоритма;
- нормализация значений пикселей в определенный диапазон.

2. Вычисление локальных характеристик.

Для каждого пикселя на изображении вычисляется локальная дисперсия в окрестности заданного размера (например,  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  или др.). Локальная дисперсия  $\sigma^2(x, y)$  вычисляется как:

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{N} * \sum (I(i, j) - \mu(x, y))^2$$

где  $N$  - количество пикселей в окрестности,  $I(i, j)$  - значение пикселя с координатами  $(i, j)$ ,  $\mu(x, y)$  - локальное среднее значение в окрестности пикселя с координатами  $(x, y)$ .

Далее вычисляется локальное среднее значение, которое может быть использовано для последующей коррекции искаженного элемента изображения:

$$\mu(x, y) = \frac{1}{N} * \sum I(i, j)$$

3. Вычисление адаптивного порога.

На основе вычисленной локальной дисперсии для каждого пикселя определяется адаптивный порог  $T(x, y)$  для обнаружения помехи. Порог  $T(x, y)$  вычисляется следующим образом:

$$T(x, y) = k * \sigma^2(x, y),$$

где  $k$  - коэффициент масштабирования, который может варьироваться в зависимости от типа и интенсивности шума, а  $\sigma^2(x, y)$  - локальная дисперсия. Значение  $k$  может определяться эмпирически на этапе тестирования.

4. Обнаружение импульсных помех.

Для каждого пикселя вычисляется разница между значением пикселя и его локальным средним значением:

$$diff(x, y) = |I(x, y) - \mu(x, y)|$$

Если разница  $diff(x, y)$  превышает адаптивный порог  $T(x, y)$ , то пиксель считается потенциальной импульсной помехой.

5. Фильтрация импульсных помех:

- если пиксель идентифицирован как импульсная помеха, его значение заменяется на медианное значение пикселей в его окрестности;
- если пиксель не является помехой, то его значение остается без изменений.

6. Постобработка.

После применения фильтрации может быть выполнена постобработка для дополнительной корректировки полученного изображения. Этот шаг может включать, например, применение малоразмерного сглаживающего фильтра (гауссова).

*Выбор параметров алгоритма*

1. Размер окрестности: выбор размера окрестности для вычисления локальных характеристик зависит от пространственной

плотности помех. При высокой плотности помех может потребоваться меньший размер окрестности;

2. Коэффициент масштабирования ( $k$ ): значение коэффициента  $k$  влияет на чувствительность алгоритма к импульсным помехам. Более высокое значение  $k$  может привести к выделению большего количества пикселей как помех, что может привести к удалению деталей изображения. Низкое значение  $k$  уменьшает чувствительность, пропуская некоторые импульсные помехи, но лучше сохраняя детали изображения. Оптимальное значение  $k$  выбирается эмпирически, на основе анализа результатов экспериментов.

#### *Преимущества разработанного подхода*

- **Адаптивность:** алгоритм адаптивно настраивает порог для выявления помех в зависимости от локальных характеристик изображения, что делает его более эффективным в различных условиях, чем методы с фиксированным порогом.

- **Эффективность:** сочетание адаптивной фильтрации и статистического анализа позволяет точно обнаруживать импульсные помехи, минимизируя при этом размытие полезных деталей изображения.

- **Гибкость:** алгоритм позволяет настраивать параметры для достижения наилучших результатов в зависимости от типа и интенсивности помех.

#### *Ограничения*

- Алгоритм может быть менее эффективным в случае сложных и неоднородных шумов, а также при очень высокой плотности импульсных помех, когда сложно различить полезные детали и шум.

- Выбор оптимальных параметров (размер окрестности, коэффициент масштабирования  $k$ ) может потребовать дополнительной настройки на основе экспериментальных данных.

- Вычислительные затраты на вычисление локальных характеристик могут быть сравнительно высокими, особенно для изображений большого размера.

Разработанный алгоритм предлагает компромисс между эффективностью удаления импульсных помех и сохранением полезных деталей.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Васильев В.И. и др. Методы и алгоритмы обработки изображений, полученных с космических аппаратов. Труды МАИ. 2010. № 39.

2. Гонсалес Р.К., Вудс Р.Э. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, испр. и доп. – Москва: Техносфера, 2024. – 1104 с.

3. Донохо Д.Л., Джонстон И.М. Идеальная пространственная адаптация с помощью вейвлет-сжатия. *Biometrika*. 1994. Том 81. № 3. С. 425–455.

4. Жук Е.Е. и др. Алгоритм адаптивной медианной фильтрации изображений, зашумленных импульсными помехами. *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 5 (54).

УДК 004.032.6

**ЛЁШИН М.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

## **АППАРАТНЫЕ КОДЕКИ В ПОТОКОВОМ ВИДЕО**

*В статье рассматриваются принципы работы и влияние на производительность систем аппаратных кодеков (H.264, HEVC, AV1 и др.).*

С развитием технологий потокового видео и увеличением спроса на контент высокого качества аппаратные кодеки стали неотъемлемой частью современных мультимедийных систем. Они обеспечивают эффективное сжатие и декодирование видеопотоков, что позволяет передавать видео высокого разрешения (4K, 8K) с минимальными задержками и нагрузкой на вычислительные ресурсы.

Цель данной статьи — рассмотреть принципы работы аппаратных кодеков, их влияние на производительность систем и сравнение с программными решениями. В рамках статьи будут рассмотрены ключевые аспекты, такие как архитектура кодеков, популярные стандарты сжатия и примеры их применения в современных устройствах и сервисах.

Кодеки (от англ. coder/decoder) — это программные или аппаратные решения, предназначенные для сжатия (кодирования) и восстановления (декодирования) цифровых аудио-/видеоданных. Их основная задача — эффективно уменьшить объем данных для: эффективной передачи по сетям (например, в потоковом видео), компактного хранения (на жестких дисках, SSD), оптимизации обработки на устройствах.

Независимо от типа кодека (аппаратный или программный), процесс включает несколько фундаментальных этапов, хотя их реализация может существенно отличаться.

1. Предобработка: разделение на кадры и GOP (GroupofPictures, коррекция цвета и баланса белого, подавление шумов и артефактов, аппаратная оптимизация динамического диапазона (в аппаратных кодеках)

2. Пространственное преобразование: разбиение кадра на макроблоки (обычно 16x16 или 32x32 пикселей), применение ДКП (DCT) или преобразования Карунена-Лоэва (KLT), адаптивное разделение на блоки разных размеров (в современных кодеках)

3. Темпоральное сжатие: анализ движения между кадрами, создание P- и B-кадров (предсказанных и двунаправленных), использование сложных алгоритмов предсказания (в кодеках H.265 или AV1)

4. Квантование (характерно для всех кодеков с потерями): уменьшение точности коэффициентов, адаптивное квантование для разных областей кадра

5. Энтропийное кодирование: алгоритмы Хаффмана или арифметическое кодирование, контекстно-адаптивное кодирование САВАС (в современных кодеках)

Декодирование представляет собой обратную последовательность этих шагов.

Аппаратные кодеки представляют собой специализированные устройства или микросхемы, предназначенные для кодирования и декодирования видеопотоков. В отличие от программных кодеков, которые выполняют эти задачи с использованием центрального процессора (CPU) или графического процессора (GPU), аппаратные кодеки реализуют алгоритмы сжатия и восстановления видео на уровне аппаратного обеспечения. Это позволяет значительно снизить нагрузку на основные вычислительные ресурсы системы и повысить общую производительность.

Ниже приведена сравнительная таблица с основными характеристиками аппаратных и программных кодеков (Таблица 1).

Основная задача аппаратных кодеков заключается в эффективном сжатии видеоданных для их передачи или хранения, а также в последующем восстановлении (декодировании) для воспроизведения. Современные аппаратные кодеки поддерживают различные стандарты сжатия, такие как H.264, H.265 и AV1, что делает их универсальными инструментами для работы с потоковым видео.



Таблица 1 – Характеристики аппаратных и программных кодеков

Характеристика	Аппаратные кодеки	Программные кодеки
Производительность	Высокая (специализированные чипы)	Средняя (зависит от CPU/GPU)
Энергоэффективность	Высокая	Низкая (высокая нагрузка на CPU)
Стоимость внедрения	Высокая	Низкая
Гибкость	Ограниченная (зависит от чипа)	Высокая (легко обновляются)
Совместимость	Ограниченная (зависит от устройства)	Высокая (работает на любом CPU/GPU)
Поддержка стандартов	Ограниченная (зависит от чипа)	Широкая (поддерживает много кодеков)
Нагрузка на CPU/GPU	Минимальная	Высокая
Применение	Потоковое видео, мобильные устройства, видеонаблюдение	Видеоконференции, стриминг, редактирование видео

Преимущество аппаратных кодеков перед программными заключается в их высокой скорости обработки данных и энергоэффективности. Это особенно важно в устройствах с ограниченными ресурсами, таких как мобильные телефоны, камеры наблюдения и портативные медиаплееры. Однако аппаратные кодеки имеют и свои ограничения, такие как высокая стоимость разработки и меньшая гибкость по сравнению с программными решениями.

Основными элементами архитектуры аппаратных кодеков являются:

- Процессоры для обработки видео.
- Память.
- Интерфейсы ввода-вывода.
- Блоки обработки сигналов.
- Управляющий модуль.

Архитектура аппаратных кодеков может варьироваться в зависимости от их назначения. Например, в мобильных устройствах используются компактные и энергоэффективные решения на базе ASIC, тогда как в профессиональном оборудовании (например,

видеокамеры или серверы потокового вещания) применяются более мощные FPGA (Field-Programmable Gate Array), обеспечивающие гибкость и высокую производительность.

Современные аппаратные кодеки поддерживают различные стандарты сжатия видео, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и области применения. Рассмотрим наиболее популярные стандарты, которые широко используются в потоковом видео, видеонаблюдении, телевещании и других сферах. В таблице ниже представлено сравнение наиболее популярных стандартов (Таблица 2).

Таблица 2 – Наиболее популярная стандарты

Характеристика	H.264 (AVC)	H.265 (HEVC)	AV1	VP9
Год выпуска	2003	2013	2018	2013
Степень сжатия	Средняя	Высокая	Отличное	Отличное
Качество видео	Хорошее	Отличное	Отличное	Отличное
Поддержка HDR	Нет	Да	Да	Да
Макс. разрешение	4K	8K	8K+	8K
Лицензирование	Платное	Платное	Бесплатное	Бесплатное
Совместимость	Очень высокая	Высокая	Средняя	Средняя
Ресурсы	Низкие	Средние	Высокие	Высокие
Применение	Потоковое видео, телевидение, видеонаблюдение	Потоковое видео, 4K/8K ТВ, камеры	Потоковое видео (YouTube, Netflix)	Потоковое видео (YouTube)

Выбор стандарта зависит от задач и требований. H.264 остается лучшим выбором для максимальной совместимости, H.265 — для устройств с поддержкой 4K/8K, а AV1 и VP9 — для компаний, стремящихся избежать лицензионных платежей. Каждый стандарт имеет свои ниши, и их использование определяется техническими, экономическими и стратегическими факторами.

Перед тем как перейти к более детальному техническому сравнению и оценке кодеков, необходимо разобраться с метриками, по которым выполняются данные операции. Сама тема оценки качества сжатия медиа крайне объемна, поэтому в рамках данной статьи мы сфокусируемся на двух ключевых параметрах: производительность

(для сравнения аппаратных и программных кодеков) и выходное качество изображения (для сравнения разных видов аппаратных кодеков) – именно для этих параметров ниже будут приведены экспериментальные данные.

Под производительностью будем понимать скорость выполнения операций кодирования/декодирования, так как данная характеристика наиболее наглядно показывает разницу разных типов кодеков (также этот параметр особенно важен для систем реального времени, набирающих большую популярность в последнее время).

Под качеством выходного изображения будем понимать степень соответствия обработанного видео исходному материалу, оцениваемая с помощью метрики PSNR (самая популярная метрика оценки качества на данный момент, подробнее будет описана ниже)

Как уже было сказано выше, аппаратные и программные кодеки решают одну и ту же задачу — кодирование и декодирование видеопотоков, но делают это принципиально разными способами. Аппаратные кодеки реализованы на уровне специализированного оборудования, тогда как программные, напротив, выполняют все операции с использованием центрального процессора (CPU) или графического процессора (GPU).

Основные различия между ними заключаются в следующем:

- Производительность: аппаратные кодеки работают быстрее благодаря специализированным компонентам.
- Энергопотребление: аппаратные решения более энергоэффективны.
- Гибкость: программные кодеки легче адаптировать под новые стандарты и задачи.
- Стоимость: Аппаратные кодеки дороже в разработке и производстве, но могут снизить общие затраты на эксплуатацию.

В качестве примера рассмотрим эксперимент с кодированием 6 различных видео с параметрами (Таблица 3).

Таблица 2 – Параметры видео в эксперименте

№	Разрешение, пикс.	Размер, МБ	Битрейт, Кб/с	Длительность, с
1	640x480	168	92160	15
2	640x480	341	92160	30
3	640x480	728	92160	66
4	1280x720	175	276480	5
5	1280x720	445	276480	15
6	1280x720	975	276480	30

На диаграмме ниже изображен результат эксперимента (Рисунок 1): количество затраченного времени (в секундах) при кодировании аппаратным кодеком («libx265» на диаграмме) и программным («h264\_vaapi» на диаграмме).

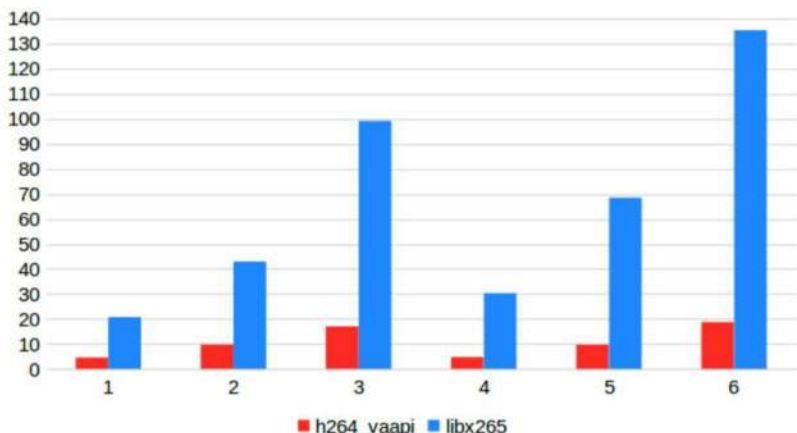


Рисунок 1 – Количество затраченного времени на кодирование видео аппаратным и программным кодеком

По результатам данного эксперимента можно сделать вывод о существенном преимуществе аппаратных кодеков в скорости: результаты отличаются более чем в 6 раз.

Разобравшись со сравнением аппаратных и программных кодеков, можно перейти к сравнению аппаратных кодеков между собой. Оценка будет производиться по метрике PSNR (от англ. Peak Signal-to-Noise Ratio – пиковое отношение сигнал/шум). PSNR является объективной метрикой для оценки качества видео или изображения после сжатия или обработки. Она вычисляется как логарифмическая величина, измеряемая в децибелах (дБ), которая сравнивает максимально возможное значение сигнала (пиковое) с уровнем искажений (шума), внесенных в процессе кодирования:

$$PSNR = 10 \cdot \log \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right), (1)$$

где  $MAX_I$  – максимально возможное значение пикселя (например, 255 для 8-битного изображения;  $MSE$  – среднеквадратичная ошибка между исходным и сжатым изображением.

Референсные значения:

- >45 дБ – практически lossless-качество (искажения неразличимы даже при профессиональном анализе);

- 35-45 дБ – отличное качество (артефакты заметны только при детальном сравнении);
- 30-35 дБ – хорошее качество (незначительные искажения в сложных сценах);
- 25-30 дБ – приемлемое качество (заметные артефакты в динамичных сценах);
- 20-25 дБ – низкое качество (явные блочные артефакты, потеря деталей);
- < 20 дБ – неприемлемое качество (сильные искажения, «размытие» контуров).

PSNR не всегда коррелирует с субъективным восприятием качества, так как не учитывает особенности человеческого зрения. Для более точной оценки часто дополняется метриками типа SSIM или VMAF (не будут рассмотрены в данной статье ввиду ограниченности объема).

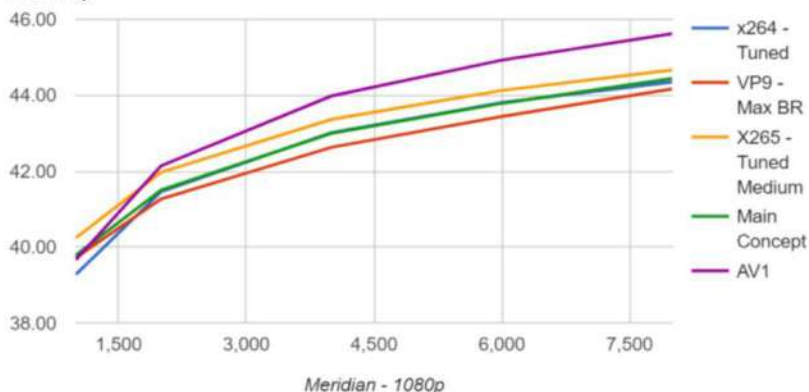


Рисунок 2 – Значение PSNR видео после кодирования

График подтверждает, что AV1 обеспечивает наилучшее качество (наибольшие значения PSNR) на всех битрейтах по сравнению с другими тестируемыми кодеками. HEVC (x265 и Main Concept) демонстрирует близкие к AV1 результаты, но с небольшим отставанием, особенно на низких битрейтах. VP9 показывает среднюю эффективность, превосходя H.264 (x264), который закономерно оказывается наименее эффективным.

Разница в 2-3 дБ PSNR между AV1 и остальными кодеками указывает на его существенное преимущество в качестве сжатия: шкала измерения в децибелах является логарифмической, а значит разница в 3 децибела означает удвоение мощности сигнала относительно шума, таким образом, разница в 3 дБ между AV1 и

HEVC эквивалентна полуторакратному-двукратному снижению уровня визуальных артефактов при одинаковом битрейте. Это делает AV1 предпочтительным выбором для задач, где важно сохранить высокое качество видео при ограниченном битрейте. Однако HEVC (X265 на графике) остается практичной альтернативой, особенно в случаях, когда поддержка AV1 ограничена.

Анализ показал, что аппаратные решения незаменимы для задач реального времени, но уступают программным в гибкости. Развитие стандартов AV1 и VVC (H.266), а также интеграция ИИ открывают новые перспективы для повышения эффективности сжатия. Аппаратные кодеки остаются ключевым компонентом современных медиасистем, определяя качество и доступность видеоконтента.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Ramil Safin, Emilia Garipova, Roman Lavrenov, Hongbing Li, Mikhail Svinin and EvgeniMagid. Hardware and software video encoding comparison // 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) – Thailand, 2020. – 5 p.

2. Pinar Akyazi and Touradj Ebrahimi. Comparison of Compression Efficiencybetween HEVC/H.265, VP9 and AV1 based on Subjective Quality Assessments // Tenth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) – Switzerland, 2018. – 6 p.

3. Zhuoran Li, ZhengfangDuanmu, Wentao Liu, and Zhou Wang AVC, HEVC, VP9, AVS2 or AV1? – A Comparative Study of State-of-the-art Video Encoders on 4K Videos // Image Analysis and Recognition. – Portugal: Springer, 2019. – С. 162-173.

4. AV1/HEVC/VP9 Comparison at Streaming Media East // Streaming Learning Center [Электронный ресурс]. – URL: <https://streaminglearningcenter.com/blogs/av1hevcvp9-comparison-streaming-media-east.html> (дата обращения: 22.03.2025).

УДК 004.032.6

**ЛЁШИН М.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **АППАРАТНАЯ ЗАЩИТА ПОТОКОВОГО КОНТЕНТА**

*В статье рассматриваются современные технологии обработки аудио и видео в системах реального времени.*

В эпоху цифровых медиа защита потокового контента становится одной из ключевых задач для правообладателей и поставщиков услуг. С развитием технологий и увеличением объемов потребляемого контента растет и риск его несанкционированного использования. Для решения этой проблемы широко применяются системы управления цифровыми правами (DRM, Digital Rights Management), которые обеспечивают защиту контента от копирования и распространения.

Особое место в экосистеме DRM занимают аппаратные модули, которые обеспечивают более высокий уровень безопасности по сравнению с программными решениями. Они интегрируются в устройства, такие как смартфоны, телевизоры и медиаплееры, и позволяют эффективно защищать контент на всех этапах его передачи и воспроизведения.

Цель данной статьи — рассмотреть принципы работы аппаратных DRM-модулей, их роль в защите потокового контента и влияние на экосистему цифровых медиа. Далее будут рассмотрены основные методы защиты контента, преимущества и недостатки аппаратных решений.

DRM (Digital Rights Management) — это набор технологий и методов, предназначенных для защиты цифрового контента от несанкционированного использования, копирования и распространения. Основная задача DRM-систем — обеспечить контроль над доступом к контенту и соблюдение прав правообладателей. Далее в статье DRM будет рассматриваться непосредственно в контексте защиты видео-контента

С развитием стриминговых сервисов, проблема защиты контента стала особенно актуальной. Без эффективных DRM-решений правообладатели теряют миллиарды долларов из-за пиратства, а пользователи сталкиваются с утечками личных данных. DRM-системы позволяют ограничить доступ к контенту только для авторизованных пользователей, а также контролировать сроки и условия использования контента.

DRM-системы используют различные методы для защиты цифрового контента, которые можно разделить на три категории: шифрование данных, водяные знаки и управление правами доступа.

Шифрование является основным методом защиты контента. Оно преобразует данные в нечитаемый формат, который может быть расшифрован только с использованием специального ключа. Это предотвращает несанкционированный доступ к контенту на этапах передачи и хранения.

Водяные знаки — это скрытые метки, которые встраиваются в контент и позволяют идентифицировать его источник. Цифровые отпечатки (fingerprinting) используются для отслеживания распространения контента. Например, если пиратская копия фильма появляется в сети, правообладатели могут определить, через какого пользователя она была утечка.

DRM-системы позволяют контролировать, кто, когда и как может использовать контент. Например, они могут ограничить количество устройств, на которых можно воспроизводить контент, или установить сроки его доступности. Это особенно важно для подписочных сервисов, где контент предоставляется на ограниченный период.

На диаграмме ниже изображена статистика популярности существующих сегодня решений (рисунок 1).

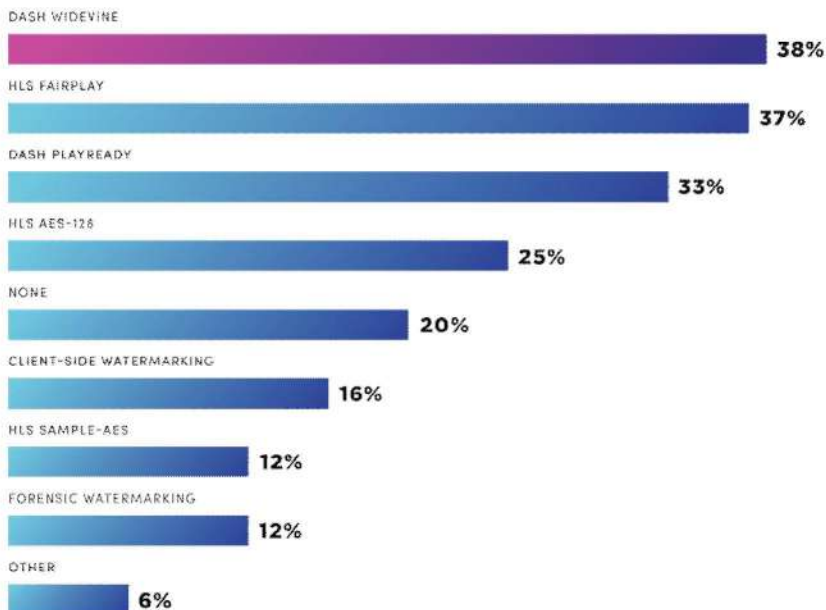


Рисунок 1 – Результат опроса «Vitmovin» разработчиков профильных сервисов: «Каким способом защиты контента вы пользуетесь»

Что представляют из себя самые популярные из них, будет рассмотрено дальше. По диаграмме также можно заметить, что часто эти методы работают в комплексе, обеспечивая многоуровневую защиту контента и минимизируя риски его несанкционированного использования.



### *Типы DRM-систем*

DRM-системы в зависимости от реализации можно разделить на: программные, аппаратные и гибридные. Каждый из этих типов имеет свои особенности, преимущества и недостатки.

Программные DRM-решения реализуются на уровне программного обеспечения и работают на универсальных процессорах (CPU). Они используются в приложениях, таких как медиаплееры или программы для чтения электронных книг. Преимущества программных DRM включают низкую стоимость внедрения и гибкость, но они менее безопасны, так как могут быть взломаны с помощью программных средств.

Аппаратные DRM-модули реализованы на уровне специализированного оборудования, такого как Trusted Platform Module (TPM) или Secure Enclave. Они обеспечивают более высокий уровень безопасности, так как защищены от взлома на программном уровне. Аппаратные DRM используются в устройствах, таких как смартфоны, Smart TV и игровые консоли.

Гибридные DRM-системы сочетают в себе элементы программных и аппаратных решений. Они обеспечивают баланс между безопасностью и гибкостью, что делает их привлекательными для задач, где важны оба аспекта. Например, гибридные DRM могут использоваться в потоковых сервисах, где часть обработки выполняется на сервере, а часть — на устройстве пользователя.

Аппаратные DRM-модули принципиально отличаются от программных решений своей архитектурой и уровнем безопасности. В то время как программные DRM работают на уровне операционной системы и могут быть уязвимы для взлома, аппаратные DRM реализованы на уровне специализированного оборудования, что делает их значительно более защищенными.

#### *Основные различия:*

**Безопасность:** Аппаратные DRM используют изолированные среды выполнения, такие как Trusted Execution Environment (TEE) или Secure Enclave, которые защищены от несанкционированного доступа.

**Производительность:** Аппаратные DRM не нагружают центральный процессор, так как задачи шифрования и управления правами выполняются на уровне специализированных микросхем.

**Надежность:** Аппаратные решения менее подвержены сбоям и ошибкам, так как их работа не зависит от операционной системы или других программных компонентов.

Современные экосистемы цифрового контента используют различные DRM-стандарты, каждый из которых имеет свои

особенности поддержки на устройствах и уровнях защиты. Как показывает практика, выбор конкретного решения часто зависит не только от требований безопасности, но и от целевой платформы (таблица 3).

Таблица 1 – Сравнительная таблица разных стандартов

Стандарт	Поддержка	Тип защиты
Widevine	Android-устройства, Chrome OS, Linux, Smart TV (Android TV, WebOS), PlayStation	L1 (аппаратный, с TEE) L3 (программный)
PlayReady	Windows-устройства, Xbox, Smart TV (Tizen, некоторые LG), браузеры (Edge, IE)	Аппаратный DRM (SL3000) Программный DRM
FairPlay	macOS, iOS/iPadOS, tvOS (Apple TV)	Аппаратный (Secure Enclave)
Primerime DRM	Smart TV (Samsung, LG), игровые консоли	Аппаратно-ускоренный
NAGRA DRM	Кабельные/IPTV-приставки, специализированные STB	Полностью аппаратный

Среди этого многообразия три решения получили наибольшее распространение благодаря своей эффективности и широкой интеграции:

Widevine (Google) — это DRM-платформа, разработанная Google. Она поддерживает несколько уровней защиты, включая аппаратное шифрование, и работает на устройствах с Android, Chrome OS, а также на Smart TV и игровых консолях. Widevine обеспечивает высокий уровень безопасности, используя изолированные среды выполнения, такие как Trusted Execution Environment (TEE).

PlayReady(Microsoft) — это DRM-решение от Microsoft, которое используется в сервисах и различных потоковых платформах. Оно поддерживает широкий спектр устройств, включая Smart TV, игровые консоли и мобильные устройства. PlayReady обеспечивает защиту контента с помощью аппаратного шифрования и управления правами доступа.

FairPlay(Apple) — это DRM-технология, разработанная Apple и используемая в экосистеме Apple (iPhone, iPad, Mac, Apple TV). FairPlay использует Secure Enclave — специализированный процессор, который обеспечивает аппаратное шифрование и безопасное хранение ключей.

Основные принципы работы аппаратных DRM включают использование изолированных сред выполнения и

специализированных микросхем для шифрования и управления правами доступа. На представленной схеме (рисунок 2) показана архитектура решения, где ключевым элементом является клиентский плеер, выполняющий дешифрацию контента непосредственно на устройстве пользователя. Плеер, взаимодействуя с сервером лицензий, получает ключи дешифрования, которые хранятся и применяются исключительно в изолированном аппаратном модуле. Это обеспечивает соответствие строгим стандартам безопасности.

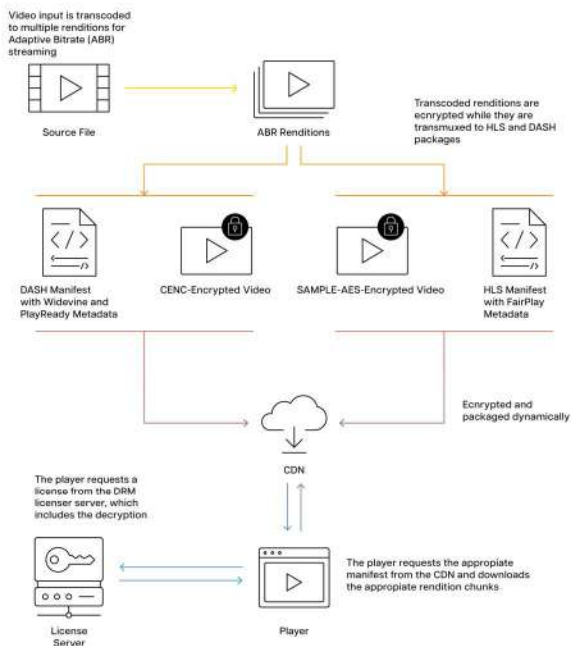


Рисунок 2 – Архитектура плеера с поддержкой DRM

Например, в устройствах с Android и Chrome OS используется Widevine с поддержкой аппаратного шифрования через TEE, представляющего собой изолированную среду выполнения, которая защищает критические операции, такие как шифрование и хранение ключей, от несанкционированного доступа. Она работает параллельно с основной операционной системой, но полностью изолирована от нее. Это предотвращает возможность взлома через уязвимости в ОС.

В Apple используется свое проприетарное решение: Secure Enclave – специализированный процессор, используемый в устройствах Apple (iPhone, iPad, Mac). Он обеспечивает аппаратное

шифрование и безопасное хранение ключей, что делает его практически неуязвимым для атак. Secure Enclave используется в DRM-решении FairPlay для защиты контента в экосистеме Apple.

Аппаратные DRM-модули играют важную роль в защите авторских прав, предоставляя правообладателям эффективные инструменты для борьбы с пиратством. Благодаря аппаратным DRM, контент надежно защищен от несанкционированного копирования, распространения и использования, что позволяет правообладателям контролировать его использование и получать доход от легального распространения.

Кроме того, аппаратные DRM помогают правообладателям отслеживать распространение контента с помощью цифровых водяных знаков и отпечатков. Если пиратская копия появляется в сети, правообладатели могут определить источник утечки и принять меры.

Использование аппаратных DRM-модулей оказывает влияние на пользовательский опыт: с одной стороны, DRM обеспечивает контент для легальных пользователей, с другой – может создавать определенные ограничения.

Благодаря данной технологии, потоковые сервисы имеют возможность предоставлять контент в высоком качестве (4K, HDR) без риска его утечки, однако это может создавать определенные неудобства. Некоторые DRM-системы ограничивают количество устройств, на которых можно воспроизводить контент, или требуют постоянного подключения к интернету для проверки прав доступа.

Современные DRM-решения стремятся найти баланс между защитой контента и удобством пользователей. Например, позволять загружать контент для просмотра офлайн, но ограничивать срок его доступности. Это обеспечивает защиту контента, не создавая излишних неудобств для пользователей.

Аппаратные DRM-модули играют важную роль в защите цифрового контента, обеспечивая высокий уровень безопасности, производительности и совместимости с различными устройствами. Они широко используются в потоковых сервисах для предотвращения пиратства и защиты авторских прав.

Перспективы развития аппаратных DRM связаны с внедрением новых технологий, таких как искусственный интеллект и блокчейн, которые могут повысить уровень безопасности и гибкости. Кроме того, развитие открытых стандартов, таких как AV1, может способствовать созданию более доступных и универсальных решений.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Nicholas Murray-Hill, Laura Fontes, Pedro Machado, Isibor Kennedy Ihianle Secure Video Streaming Using Dedicated Hardware // Journal of Signal Processing Systems. – 2023. – №95. – С. 1-11.
2. DRM (Digital Rights Management): The Definitive Guide [2023] [Электронный ресурс]. – URL: <https://bitmovin.com/blog/digital-rights-management-everything-to-know/> (дата обращения: 29.03.2025).
3. How to protect content with drm video streaming [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.brightcove.com/tech-talk/dealing-drm-understanding-drm-and-how-produce-protected-content/> (дата обращения: 29.03.2025).

УДК 004.932.2

**МАЛИН И.С.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО БЕСПИЛОТНЫМ АВИАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ МАШИНЫМ ЗРЕНИЕМ**

*В статье рассмотрены беспилотные авиационные системы (БАС) в контексте работы с машинным зрением, дан обзор основным подходам к разработке систем с машинным зрением на основе открытых программных решений, а так же приведён обзор различных типов коммерческих систем, связанных с обработкой изображений, получившие наибольшее распространение в бизнес сфере.*

Развитию БАС способствовало повышение качества аппаратных составляющих, силовых установок, а так же аккумуляторных установок, при этом развитие некоторых операционных систем (ОС) / программного обеспечения (ПО) для БАС началось в тот момент, когда установки были недостаточно развиты. К тому же, не все решения были направлены на коммерческую реализацию в бизнес сфере, из-за чего в открытых программных (open source) решениях (таких как «Ardupilot», «Inav», «Betaflight»), изначально могла либо отсутствовать поддержка алгоритмов компьютерного зрения, либо быть реализована способом, не пригодным для решения определённых задач, ввиду высоких задержек и малой частоты обработки (что присутствует в некоторых системах с внешним вычислителем («companion computer» при передаче данных).

Помимо этого, существующие общепринятые решения по машинному зрению, часто не ориентированы на применение их в

реальных (не академических) условиях, а те решения, что позволяют решить задачу в требуемой предметной области, остаются коммерческой тайной, либо не распространены. Из-за чего, возникает актуальная необходимость в обзоре современных коммерческих решений, а так же способе их реализации.

В данной работе рассматриваются только современные способы решения прикладных задач, связанных с компьютерным зрением в БАС.

Цель данной работы заключается в обзоре современных коммерческих решений, связанных с обработкой изображений, и эффективному способу их реализации.

*Методы интегрирования алгоритмов компьютерного зрения в БАС*

Стоит отметить, что текущие решения по интеграции компьютерного зрения в open source системах в сфере БПЛА основаны на понятии внешнего вычислителя («companion computer»), что подключается к БПЛА по определённым каналам связи. Внешний вычислитель берёт на себя задачу по уточнению позиции БПЛА, задачу управления БПЛА на основе некоторого алгоритма, что реализуется в контексте предметной области, а так же другие задачи, связанные непосредственно с предметной областью (в том числе, связанные с обработкой видео потока с помощью машинного зрения). Пример подключения внешнего компьютера по подобной схеме через порт телеметрии представлен на рисунке 1.

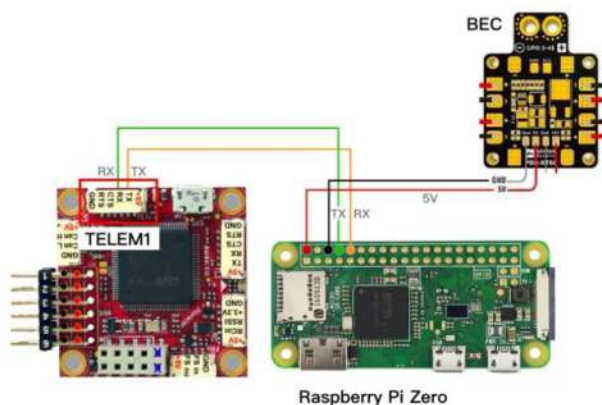


Рисунок 1 – Схема подключения внешнего вычислителя («Raspberry Pi Zero») к полётному контроллеру БПЛА

Ниже представлены некоторые из методов подключения внешнего вычислителя.

*Системы, основанные на физическом перехвате потока управления с пульта*

В таких системах для управления БПЛА используется эмуляция данных канала управления с пульта оператора для передачи управляющего сигнала. Обратная связь поступает в основном с камеры (аналоговая / цифровая), может так же использоваться порт телеметрии.

Преимущества данных систем заключаются в том, что при должной автоматизации калибровки параметров / выборе устойчивой системы регулирования, практически любой БПЛА (указанного для данного устройства типа), основанный на общепринятых протоколах взаимодействия с пультом (контроллером) оператора, будет совместим с данным модулем и полностью поддерживать его функционал. Часто, в коммерческих решениях такого рода создают излишнюю избыточность по каналам связи с БПЛА / протоколам, для того, чтобы покрыть нужды как можно большей целевой аудитории. Пример схемы подключения такого модуля (представленного в [1]) представлен на рисунке 2.

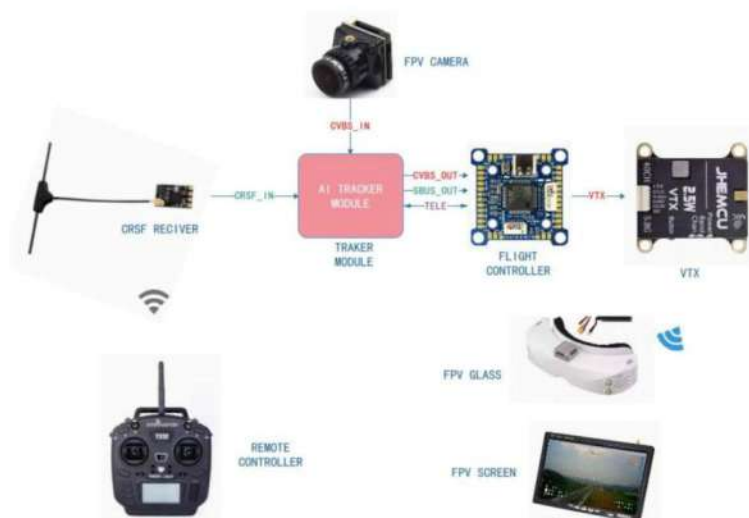


Рисунок 2 – Схема подключения внешнего вычислителя с физическим перехватом потока управления пульта

*Системы, основанные на командах управления*

В таких системах для управления БПЛА используются общепринятые протоколы передачи телеметрии и управления («Mavlink» или «MSP»). Для этого внешний вычислитель подключается по схеме, представленной ранее (см. рисунок 1). По данному порту происходит не только передача управления, но так же и обратная связь.

Стоит отметить, что данный подход подходит для прошивок «Ardupilot» / «INAV» / «Betaflight», при получении достаточной частоты обновлений данных для решаемой задачи (реализация «Ardupilot» «Mavlink» в некоторых задачах даёт недостаточную частоту обновления данных, что решается использованием подхода, основанного на физическом перехвате потока управления с пульта, либо модификацией самой прошивки)

При этом, использование фреймворка «ROS» для общения по данному протоколу помогает абстрагироваться от представления команд, сосредотачиваясь только на представлении топиков. К сожалению, «ROS» при решении практических задач часто уступает по производительности (частота обновления данных, задержка при передаче большого объёма данных между топиками), поэтому, для задач, требующих оперативного реагирования (системы регулирования, или передача данных для систем регулирования) возможно использование более примитивных фреймворков / библиотек, что работают непосредственно с «Mavlink» / «MSP» без дополнительной прослойки. Тем не менее, для решения некоторых задач, не требующих высокой частоты обновления / малых задержек, таких как слежение за некоторой областью пространства (например, нефтеперерабатывающая установка) с целью нахождения объектов / аномалий, ROS фреймворк имеет преимущество, ТК позволяет использовать микросервисный подход, что может упростить разработку решений.

*Системы, основанные на топиках*

Такие системы свойственны прошивке «PX4» (подробный обзор приведён в [2]). «PX4» поддерживает предыдущие описанные решения по задаче взаимодействия с внешним вычислителем, при этом позволяют так же использовать другой протокол / подход, основанный на передаче данных непосредственно между топиками «PX4» и топиками «ROS». Данная прошивка является реактивной, т.е. топиками «PX4» являются внутренними структурами прошивки, что используются непосредственно в логике управления БПЛА. Схема подключения совпадает системами, основанными на командах



управления, но сам порт передаёт не телеметрию «Mavlink», вместо этого он является портом для взаимодействия между топиками (рисунок 3).

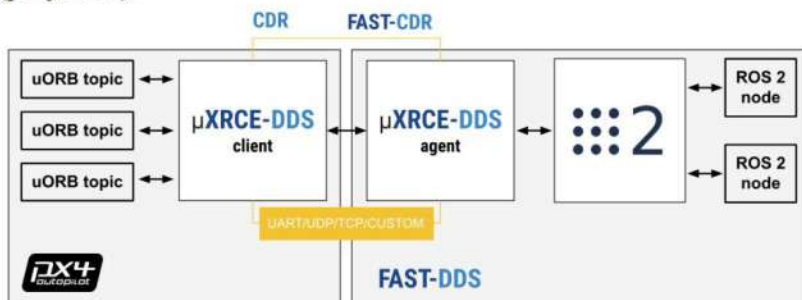


Рисунок 3 – Схема беспроводного взаимодействия узлов ROS с топиками PX4

#### *Примеры систем, основанных на компьютерном зрении в БАС*

В контексте способов применения БАС, основанных на компьютерном зрении в коммерческих решениях, что получили наибольшее распространение, можно выделить несколько перспективных направлений: использование БПЛА с оператором (для оперативного мониторинга, разведки, или съёмки некоторой местности), использование БАС для мониторинга объектов предприятия, использование БАС для комплексного мониторинга местности с целью анализа оперативной обстановки.

*Использование БПЛА с оператором (для оперативного мониторинга, разведки, или съёмки некоторой местности)*

В данном случае, оператор непосредственно управляет БПЛА, либо его полётным заданием, с использованием пульта (как в решениях [3], [4] и [5]), либо наземной станции управления. Отдельного внимания заслуживает подход компании «DJI», в котором пользовательский интерфейс большинства контроллеров управления БПЛА, является однотипным, и основан на различных модификациях одного и того же «Android» приложения, а сами контроллеры представляют из себя компьютеры под управлением операционной системы «Android», что делает взаимодействие оператора с системой более интуитивной (рисунок 4).



Рисунок 4 – Контроллер DJI RC Plus

#### *Использование БАС для мониторинга объектов предприятия*

В данном случае, одним из эффективных подходов является применение облачных технологий, и аппаратных решений по автоматизации процесса полета (как в [6]). БПЛА в автоматическом режиме производит взлёт с док станции, полёт с мониторингом выделенных участков / произведением необходимых операций, автоматическую посадку и связь с сервером (передачу полученных данных). На сервере в свою очередь находится программа (например [7]), обеспечивающая поддержку принятия решений / анализа и визуализации данных (рисунок 5).



Рисунок 5 – Облачная платформа DJI FlightHub 2

Участие обслуживающего персонала / операторов сводится к созданию программы полётных миссий с помощью специального ПО (чаще всего от той же фирмы, что предоставляет БАС), и

техническому обслуживанию БПЛА, в промежутках между полётами (по необходимости).

*Использование БАС для комплексного мониторинга местности с целью анализа оперативной обстановки*

Отдельного внимания заслуживают системы комплексного мониторинга местности, основанные на подходе сенсоров («sensors»), которыми могут являться БАС. Пример такой системы – «Plantir Gotham» [8], - облачная платформа, что позволяет объединять данные, собранные с различных датчиков, для применения комплексного анализа и поддержке принятия решений. В данном случае БАС рассматривается лишь в контексте сенсоров, либо исполнительного механизма («acutator» / «effector», как для случая ударных БПЛА). Форма БАС и аппаратная реализация не играют существенную роль, все алгоритмы обработки данных (машинное зрение / сопоставление изображений ДЗЗ с картой местности) происходит на стороне сервера, в результате чего формируется список рекомендаций (например, по применению определенных ударных БПЛА в контексте военных операций). Основное отличие данной облачной системы от системы «ДЛ» заключается в том, что сенсоры и исполнительные механизмы являются лишь частью системы, в которой принятие решений, управление БПЛА и другой функционал распределён между различными операторами / лицами, ответственными за принятие решений, а сбор графических данных – не является конечной целью. Интерфейс данной системы представлен на рисунке 6.

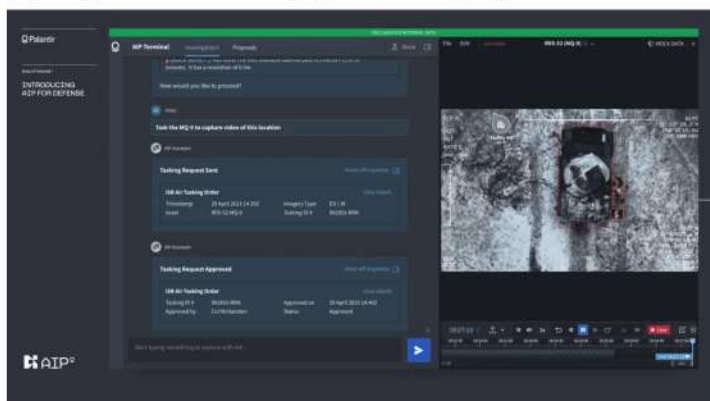


Рисунок 6 – Облачная платформа Plantir Gotham

В рамках данной работы был произведён обзор основных способов подключения внешнего вычислителя к open source решениям БАС, а так же некоторые из наиболее распространённых коммерческих

решений в бизнес сфере, связанными с компьютерной обработкой изображений.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Hambling, D. (2025). Ukrainian FPV Operator Reviews AI-Enabled Lock-On Target Drones. Forbes. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.forbes.com/sites/davidhambling/2025/03/05/ukrainian-fpv-operator-reviews-ai-enabled-lock-on-target-drones/> (дата обращения: 15.04.2025).
2. PX4. (n.d.). ROS 2 User Guide. PX4 Docs. [Электронный ресурс] – URL: [https://docs.px4.io/main/en/ros2/user\\_guide.html](https://docs.px4.io/main/en/ros2/user_guide.html) (дата обращения: 15.04.2025).
3. SIYI. (n.d.). MK32 Handheld Ground Station Smart Controller. SIYI. [Электронный ресурс] – URL: <https://shop.siyi.biz/products/mk32-handheld-ground-station-smart-controller> (дата обращения: 15.04.2025).
4. DJI. (n.d.). DJI RC. DJI. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.dji.com/rc> (дата обращения: 15.04.2025).
5. Skydroid. (n.d.). Skydroid H30 Remote Control. ZHTAero. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.zhtaero.com/product/skydroid-h30-remote-control> (дата обращения: 15.04.2025).
6. DJI. (n.d.). DJI Dock. DJI Enterprise. [Электронный ресурс] – URL: <https://enterprise.dji.com/dock> (дата обращения: 15.04.2025).
7. DJI. (n.d.). DJI FlightHub 2. Aeromotus. [Электронный ресурс] – URL: <https://aeromotus.ru/product/dji-flighthub-2/> (дата обращения: 15.04.2025).
8. Palantir. Gotham. Palantir. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.palantir.com/platforms/gotham> (дата обращения: 15.04.2025).

УДК 004.65

### **МИРОНОВ М.С.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

*В статье рассматриваются современные методы и перспективы применения аддитивных технологий (3D-печати) в проектировании и производстве электронных средств (ЭС). Анализируются ключевые направления использования 3D-печати, включая создание корпусов, радиаторов, антенн, печатных плат и функционально интегрированных устройств.*

Современные электронные средства (ЭС) предъявляют все более строгие требования к миниатюризации, функциональной насыщенности и скорости разработки. Однако традиционные подходы к проектированию и производству электроники сталкиваются с существенными ограничениями. Высокая стоимость изготовления сложных компонентов, длительные циклы разработки и технологические барьеры при создании нестандартных конструкций стали серьезным вызовом для индустрии.

Аддитивные технологии, и, в частности, 3D-печать, предлагают принципиально новые решения этих проблем. Как наиболее динамично развивающееся направление цифрового производства, 3D-печать позволяет создавать электронные компоненты с беспрецедентной точностью, существенно сокращая как материальные затраты, так и сроки вывода изделий на рынок. Особую ценность представляет возможность быстрого прототипирования, позволяющая инженерам оперативно тестировать и совершенствовать свои разработки.

Современная электронная промышленность активно осваивает несколько ключевых методов аддитивного производства:

- FDM-технология (послойное наплавление) идеально подходит для создания корпусных элементов, крепежных деталей и теплоотводящих структур. Ее преимущество - в простоте использования и доступности материалов.

- Стереолитография (SLA/DLP) обеспечивает высочайшую точность при производстве деталей с мелкими элементами благодаря использованию фотополимеризующихся смол.

- Технология селективного лазерного спекания (SLS) незаменима при создании прочных и термостойких компонентов, выдерживающих экстремальные условия эксплуатации.

- Металлическая 3D-печать (DMLS, EBM) открывает новые возможности в производстве радиаторов, экранов и токопроводящих элементов с уникальными характеристиками.

- Инновационная струйная печать проводящими чернилами позволяет создавать гибридные электронные устройства, нанося токопроводящие дорожки непосредственно на трехмерные подложки.

Аддитивные технологии находят все более широкое применение в различных аспектах проектирования электронных средств:

- В области корпусов и механических компонентов 3D-печать позволяет создавать сложные геометрические формы с интегрированными креплениями и кабель-каналами, что значительно упрощает процесс сборки и уменьшает количество отдельных деталей.

- При проектировании систем охлаждения аддитивные методы дают возможность создавать оптимизированные радиаторы с развитой поверхностью, что критически важно для современных компактных электронных устройств с высоким тепловыделением.

- В радиочастотной технике 3D-печать используется для производства антенн сложной формы, включая фазированные антенные решетки и линзы, что позволяет достигать уникальных характеристик излучения.

- Наиболее перспективным направлением является создание многослойных печатных плат и гибридной электроники, где аддитивные технологии позволяют интегрировать компоненты в трехмерном пространстве, создавая принципиально новые архитектуры электронных устройств.

Современные аддитивные технологии открыли новые горизонты в производстве печатных плат, позволив перейти от плоских двумерных структур к сложным трехмерным электронным компонентам. Принципиальное отличие 3D-печатных плат заключается в возможности формирования многослойных архитектур с пространственной ориентацией токопроводящих элементов. Технология основана на послойном нанесении полимерных диэлектриков (ABS, PLA, фотополимеров) с последующим точным нанесением токопроводящих составов на основе наночастиц серебра, меди или графена. Это позволяет создавать межсоединения в трехмерном пространстве с углами наклона до 45 градусов и формировать переходные отверстия без механического сверления, что невозможно в традиционном производстве.

Ключевой особенностью 3D-печатных плат является использование функциональных материалов с регулируемыми свойствами. Современные диэлектрики обладают контролируемой проницаемостью в диапазоне от 2.5 до 25, что особенно важно для высокочастотных применений. Для работы в экстремальных условиях разработаны терморезистивные композиты, сохраняющие стабильность при повышенных температурах. В области носимой электроники активно применяются гибкие подложки на основе термопластичного полиуретана (TPU). Технологические параметры 3D-печати достигли впечатляющих показателей: разрешение печати проводящих дорожек составляет 20-100 мкм при толщине слоя 5-50 мкм, а сопротивление серебряных проводников не превышает 0.1 Ом на квадрат.

Практическая реализация трехмерных печатных плат включает несколько важных направлений. Во-первых, это создание встроенных пассивных компонентов непосредственно в процессе печати.

Технология позволяет формировать резисторы с контролируемым сопротивлением от 10 Ом до 1 МОм, конденсаторы межслойной структуры емкостью до 100 нФ, а также различные индуктивные элементы, включая катушки и трансформаторы. Во-вторых, развиваются гибридные подходы, сочетающие аддитивное производство с традиционным монтажом компонентов. Это включает интеграцию SMD-элементов по технологии "pick-and-place", создание специальных полостей для монтажа микросхем и формирование эффективных тепловых каналов охлаждения. Особый интерес представляют специализированные применения, такие как изготовление антенных структур СВЧ-диапазона с градиентными свойствами, датчиков давления с полостями переменного объема и гибких интерконнекторов для робототехнических систем.

Сравнительный анализ традиционных и 3D-печатных плат показывает существенные преимущества аддитивных технологий. В то время как традиционные методы ограничены 16-32 слоями, 3D-печать не имеет принципиальных ограничений по количеству слоев. Разрешение печати достигает 20-50 мкм против минимального шага 100 мкм в классическом производстве. Временные затраты на прототипирование сокращаются с 5-7 дней до 2-24 часов, а стоимость малосерийного производства снижается на 60%. Главное преимущество - полная свобода в создании трехмерных форм

Однако технология сталкивается с рядом вызовов, требующих дальнейших исследований. Ключевые проблемы включают необходимость разработки специализированных материалов с улучшенными адгезионными свойствами, ограниченную совместимость с высокотемпературными процессами пайки, ограничения по максимальному току (до 5 А для печатных проводников) и необходимость сложной постобработки, включающей процессы полимеризации и спекания. Перспективным направлением развития является создание гибридных установок, объединяющих FDM-печать диэлектриков и струйное нанесение функциональных материалов, что позволит реализовать концепцию полностью печатных электронных устройств в едином технологическом цикле. Эти разработки открывают путь к принципиально новому подходу в проектировании и производстве электронных систем, где границы между механическими и электронными компонентами становятся все более размытыми.

Ключевые преимущества аддитивных технологий в электронике включают сокращение сроков разработки в разы благодаря возможности быстрого прототипирования, снижение материальных

затрат за счет минимизации отходов и свободу проектирования, позволяющую реализовывать самые смелые инженерные решения.

Перспективные направления развития включают создание многофункциональных 3D-принтеров, способных одновременно работать с проводящими и диэлектрическими материалами, внедрение искусственного интеллекта для оптимизации конструкций, а также разработку экологичных биоразлагаемых материалов для устойчивого производства.

3D-печать стремительно превращается в ключевую технологию электронной промышленности, предлагая уникальные решения современных инженерных задач. Дальнейшее развитие аддитивных методов производства открывает путь к созданию электронных устройств нового поколения - более компактных, функциональных и эффективных. Это создает фундамент для настоящей революции в проектировании и производстве электронных средств, кардинально меняя парадигму всей отрасли.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015) Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer-Verlag, New York, XXI, 498.
2. Espalin D. et al. 3D Printing of Electronics: A Review // Journal of Electronic Packaging. – 2020.
3. Wong K.V., Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing // ISRN Mechanical Engineering. – 2012.

УДК 004.42

**МОТИН И.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

#### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GSM И ИНТЕРНЕТ-УВЕДОМЛЕНИЙ**

*Рассматривается разработка системы мониторинга температуры и влажности, использующей технологии GSM и интернет-уведомлений. Основное внимание уделяется архитектуре системы, выбору компонентов и алгоритмам обработки данных, что позволяет обеспечить эффективный контроль климатических условий в различных сферах, таких как сельское хозяйство, промышленность и научные исследования.*



В современном мире, где технологии стремительно развиваются, необходимость в эффективных системах мониторинга окружающей среды становится все более актуальной. Изменения температуры и влажности могут оказывать значительное влияние на различные сферы деятельности, включая сельское хозяйство, промышленность и даже повседневную жизнь. Например, в сельском хозяйстве правильный контроль за климатическими условиями может существенно повысить урожайность и качество продукции. В промышленности поддержание оптимальных условий хранения материалов и продукции также критически важно для обеспечения их качества и долговечности.

Системы мониторинга, использующие GSM-технологии и интернет-уведомления, представляют собой инновационное решение для решения этих задач. Они позволяют не только собирать данные о температуре и влажности в реальном времени, но и оперативно уведомлять пользователей о любых отклонениях от заданных параметров. Это особенно важно в условиях, когда время реакции на изменения может сыграть решающую роль.

На сегодняшний день существует множество систем мониторинга температуры и влажности, которые используют различные технологии для сбора данных и передачи информации пользователям. Например, некоторые системы применяют Wi-Fi для передачи данных на серверы или мобильные устройства, тогда как другие используют радиочастотные технологии или проводные соединения.

Однако многие из этих решений имеют свои ограничения: высокая стоимость установки, необходимость постоянного подключения к электросети или сложности в настройке. Использование GSM-технологий позволяет преодолеть эти недостатки благодаря возможности работы в удаленных местах без необходимости подключения к стационарным источникам питания или интернету.

Таким образом, разработка системы мониторинга температуры и влажности с использованием GSM-технологий представляет собой актуальную задачу, способную значительно улучшить контроль за климатическими условиями в различных сферах деятельности.

GSM (Global System for Mobile Communications) — это стандарт мобильной связи, который широко используется для передачи голосовых и данных. Он обеспечивает надежную связь на больших расстояниях и позволяет передавать информацию в реальном времени. Основные преимущества использования GSM в системах мониторинга включают:

Широкая доступность: GSM-сети охватывают большую часть населенных пунктов, что делает их идеальными для удаленных мест, где нет доступа к проводным сетям.

Низкое энергопотребление: Устройства, использующие GSM, могут работать от батарей, что позволяет им функционировать в условиях отсутствия электросети.

Доступность услуг передачи данных: GSM поддерживает передачу данных через SMS и GPRS, что позволяет отправлять уведомления пользователям о состоянии системы.

В контексте мониторинга температуры и влажности GSM-технологии позволяют передавать данные с датчиков на мобильные устройства или серверы, обеспечивая оперативное реагирование на изменения условий.

Интернет-технологии играют ключевую роль в современных системах мониторинга. Они позволяют не только собирать данные, но и обрабатывать их для дальнейшего анализа. Основные аспекты применения интернет-технологий в системах мониторинга включают:

Облачные решения: Использование облачных платформ для хранения и обработки данных позволяет пользователям получать доступ к информации из любой точки мира через интернет.

Мобильные приложения: Разработка мобильных приложений для пользователей обеспечивает удобный интерфейс для получения уведомлений и управления системой.

Интернет вещей (IoT): Интеграция с IoT позволяет объединять различные устройства в единую сеть, что значительно расширяет функциональность системы.

Системы уведомлений могут быть реализованы через электронную почту, SMS или push-уведомления в мобильных приложениях. Это обеспечивает пользователям возможность оперативно реагировать на изменения условий.

Существует несколько подходов к мониторингу температуры и влажности, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки:

Проводные системы:

Преимущества: Высокая надежность передачи данных; отсутствие помех от внешних факторов.

Недостатки: Сложность установки; необходимость прокладки кабелей; ограниченная мобильность.

Беспроводные системы (Wi-Fi):

Преимущества: Простота установки; возможность интеграции с существующими сетями.

Недостатки: Зависимость от наличия Wi-Fi-сигнала; высокая потребность в энергии.

Системы на основе GSM:

Преимущества: Широкая доступность; возможность работы в удаленных местах; низкое энергопотребление.

Недостатки: Зависимость от качества сигнала сети; возможные дополнительные расходы на услуги связи.

Системы IoT:

Преимущества: Высокая степень интеграции; возможность автоматизации процессов; доступ к данным в реальном времени.

Недостатки: Сложность настройки; необходимость защиты данных от несанкционированного доступа.

В результате анализа различных подходов можно сделать вывод о том, что системы на основе GSM представляют собой оптимальное решение для задач мониторинга температуры и влажности в условиях ограниченного доступа к электросетям и интернету.

Проектирование архитектуры системы мониторинга температуры и влажности включает в себя несколько ключевых компонентов, которые взаимодействуют друг с другом для обеспечения эффективного сбора, обработки и передачи данных. Основные элементы системы:

Датчики температуры и влажности: Эти устройства отвечают за сбор данных о текущих климатических условиях. Они могут быть как цифровыми, так и аналоговыми, в зависимости от требований к точности и стоимости.

Микроконтроллер: Центральный элемент системы, который обрабатывает данные от датчиков и управляет процессом передачи информации. Микроконтроллер может быть программируемым (например, Arduino или Raspberry Pi) и должен поддерживать GSM-модуль для отправки данных.

GSM-модуль: Устройство, обеспечивающее связь с мобильной сетью для передачи данных на сервер или мобильное устройство пользователя. GSM-модуль может работать как с SMS, так и с GPRS для передачи данных.

Сервер или облачное хранилище: Место, где хранятся собранные данные и осуществляется их обработка. Сервер может быть локальным или облачным, в зависимости от требований к доступности и безопасности.

Мобильное приложение или веб-интерфейс: Интерфейс для пользователя, который позволяет просматривать данные о температуре

и влажности, а также получать уведомления о критических изменениях.

#### *Взаимодействие компонентов системы*

Взаимодействие между компонентами системы можно описать следующим образом:

**Сбор данных:** Датчики температуры и влажности периодически измеряют климатические параметры и передают эти данные на микроконтроллер.

**Обработка данных:** Микроконтроллер получает данные от датчиков, обрабатывает их (например, фильтрует шумы) и сравнивает с заданными пороговыми значениями.

**Передача данных:** если параметры выходят за пределы допустимых значений (например, температура слишком высокая или низкая), микроконтроллер активирует GSM-модуль для отправки уведомления пользователю через SMS или интернет-уведомление.

**Хранение данных:** Собранные данные могут также передаваться на сервер или в облачное хранилище для дальнейшего анализа и хранения.

**Уведомление пользователя:** Пользователь получает уведомление о состоянии системы через мобильное приложение или веб-интерфейс, где он может просмотреть историю изменений параметров.

#### *Выбор компонентов системы*

При проектировании системы необходимо тщательно выбирать компоненты на основе следующих критериев:

**Точность датчиков:** Датчики должны обеспечивать необходимую точность измерений в зависимости от области применения (например, сельское хозяйство требует более высокой точности).

**Энергопотребление:** важно выбирать компоненты с низким энергопотреблением для увеличения времени работы от батареи.

**Совместимость:** Все компоненты должны быть совместимы друг с другом по протоколам связи (например, I2C, SPI) и по напряжению питания.

**Стоимость:** необходимо учитывать бюджет проекта при выборе компонентов без ущерба для качества.

**Надежность:** Компоненты должны быть устойчивыми к внешним воздействиям (влага, температура) в зависимости от условий эксплуатации.

#### *Программное обеспечение*

Программное обеспечение играет ключевую роль в функционировании системы мониторинга. Необходимо разработать алгоритмы для обработки данных от датчиков, управления GSM-

модулем и взаимодействия с сервером. Создание удобного интерфейса для мобильного приложения или веб-портала позволит пользователям легко получать доступ к данным и управлять системой.

Сервер должен иметь возможность обрабатывать входящие данные, хранить их в базе данных и предоставлять пользователям актуальную информацию через API.

Реализация механизма отправки уведомлений пользователям при изменении состояния параметров (например, превышение пороговых значений).

Программирование микроконтроллера

Программирование микроконтроллера — ключевой этап реализации системы:

Разработка алгоритма работы:

Определяется последовательность действий: считывание данных с датчиков, обработка данных, отправка уведомлений при превышении пороговых значений.

Использование библиотек:

Подключаются необходимые библиотеки для работы с датчиками и GSM-модулем (например, DHT библиотека для работы с DHT11/DHT22).

Кодирование логики работы системы:

```
#include <DHT.h>
#include <SoftwareSerial.h>
// Определение пинов
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    dht.begin();
    // Инициализация GSM
    // ...
}
void loop() {
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();
    if (isnan(h) || isnan(t)) {
        Serial.println("Ошибка чтения данных!");
        return;
    }
    // Логика отправки уведомлений
    if (t > 30 || h > 70) {
        // Отправка SMS через GSM
```

```
        // ...  
    }  
    delay(2000); // Задержка между измерениями  
}
```

Для разработки системы мониторинга температуры и влажности часто используются специализированные программные библиотеки, которые значительно упрощают работу с датчиками. Такие библиотеки предоставляют готовые функции для считывания данных, обработки сигналов и взаимодействия с аппаратной частью. Например, для платформы Arduino существуют библиотеки, позволяющие быстро подключить и настроить датчики температуры и влажности, такие как DHT11 или DHT22. Использование этих библиотек помогает избежать необходимости писать низкоуровневый код с нуля, что ускоряет процесс разработки и снижает вероятность ошибок. Кроме того, многие из этих библиотек имеют активное сообщество пользователей, что облегчает поиск решений при возникновении проблем и позволяет использовать проверенные методы работы с оборудованием. Таким образом, программное обеспечение в виде специализированных библиотек является важным инструментом при создании надежных и эффективных систем мониторинга окружающей среды.

Практическое значение системы заключается в ее широком применении в различных областях, таких как сельское хозяйство, промышленность и научные исследования. Она предлагает доступное и эффективное решение для контроля климатических условий, что позволяет оптимизировать процессы и повышать качество продукции.

В дальнейшем можно рассмотреть возможность интеграции дополнительных датчиков, таких как датчики CO<sub>2</sub> или освещенности, а также улучшение алгоритмов обработки данных для повышения точности и надежности системы. Также стоит обратить внимание на расширение функциональности пользовательского интерфейса, чтобы сделать его более интуитивно понятным и удобным для пользователей.

Таким образом, разработанная система мониторинга температуры и влажности представляет собой значимый вклад в развитие технологий контроля климатических условий и может стать основой для будущих исследований и разработок в данной области.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Алиев Т.И. Основы проектирования систем: Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 120 с.
2. Воробьев В.А. Электрификация и автоматизация сельскохозяйственного производства. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 278 с.

3. Наumenко А.П., Кудрявцева И.С. Теория и методы мониторинга и диагностики технических систем. Учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 204 с.

4. Петров П.П. Современные технологии мониторинга температуры и влажности. Журнал автоматизации. 2021. № 5. С. 45-50.

УДК 004.8

**МУРАНОВ В.П.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИЗ САД-ПРОГРАММ**

*В данной статье рассматривается возможность применения нейросетей для анализа данных о конструкции печатных плат представленных в виде файлов из различных систем автоматизированного проектирования.*

Нейросети находят всё более широкое применение в различных отраслях промышленности, и производство многослойных печатных плат не стало исключением. Эти технологии способны значительно улучшить процессы проектирования и производства за счёт применения алгоритмов машинного обучения, что в свою очередь снижает вероятность ошибок и повышает качество конечного продукта.

С точки зрения практической реализации, важно учитывать необходимость интеграции нейросетей с существующими системами проектирования. Создание модели нейросети для оптимизации проектирования многослойных печатных плат требует интеграции множества компонентов, включая обработку данных, настройку алгоритмов и оценку результатов. В основе разработки лежит использование данных, которые могут быть извлечены из различных источников, таких как успешно произведенные изделия, файлов программ САПР, данные о дефектах и сведения о производстве. Нейросети эффективно анализируют эти данные, чтобы выявить закономерности, которые могут не быть очевидными для традиционных методов анализа, включая оптимизацию конструкции и выявление потенциальных проблем.

Одним из ключевых аспектов является создание модели, которая будет учитывать конкретной печатной платы. Нейронные сети

защищают от возможных ошибок, связанных с шаблонным подходом, и обеспечивают более высокую надежность благодаря их обучаемости.

Обучение нейросети включает выбор соответствующих алгоритмов и параметров для обучения. Важную роль играет архитектура самой нейросети. Простая модель может не справляться с высокой сложностью данных, в то время как слишком сложная модель может переобучаться, теряя свою способность к обобщению. Существует необходимость в разработке балансирующей модели, способной адаптироваться под специфику проектирования и производства многослойных печатных плат. Для этого используется многоуровневая структура сети, где каждый уровень обучается на различных аспектах данных.

Подготовка данных также играет важную роль в обучении нейросети. Процесс включает в себя очистку данных, их нормализацию и расширение для достижения высоких показателей точности. Например, необходимо учитывать потенциальные ошибки в данных, такие как неподходящие характеристики материалов или нестабильные условия производства. Устранение таких ошибок до начала обучения гарантирует, что нейросеть не будет „заблуждаться“ при принятии решений на основе смущающих факторов.

Ниже приведен фрагмент кода на языке программирования Python, который включает в себя основные функции для реализации анализа данных САПР файлов для создания рекомендаций к производству многослойных печатных плат: загрузка гербер файлов, их анализ, создание модели нейросети и экспорт результатов в формате .doc.

```
import pandas as pd
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers
import gerber
from docx import Document
# Функция для анализа гербер файла
def analyze_gerber(file_path):
    # Чтение гербер файла
    gbr = gerber.load(file_path)
    # Можно добавить код для анализа данных из gbr:
    # информацию о слоях, компонентах и т.д.
    analysis_results = {
        'num_layers': len(gbr.layers),
        'num_components': len(gbr.components),
        # Здесь можно добавить больше информации }
    return analysis_results
```



```
# Создание нейросети
def create_model(input_shape):
    model = keras.Sequential([
        layers.Dense(64, activation='relu',
input_shape=input_shape),
        layers.Dense(64, activation='relu'),
        layers.Dense(1, activation='sigmoid') #
Может быть другой активаций, в зависимости от задачи ])
    model.compile(optimizer='adam',
loss='binary_crossentropy', metrics=['accuracy'])
    return model

# Экспорт результатов в .doc
def export_to_doc(results, filename):
    doc = Document()
    doc.add_heading('Рекомендации по производству
печатных плат', level=1)
    for key, value in results.items():
        doc.add_paragraph(f'{key}: {value}')
    doc.save(filename)

# Главная функция
def main(gerber_files):
    all_analysis_results = []
    # Анализируем каждый гербер файл
    for file in gerber_files:
        results = analyze_gerber(file)
        all_analysis_results.append(results)
    # Преобразование данных для обучения нейросети
    df = pd.DataFrame(all_analysis_results)
    X = df.values # Преобразование в массив для
подачи на вход нейросети
    # Создание и обучение модели (примерно)
    model = create_model(input_shape=(X.shape[1],))
# опираясь на количество признаков
    y = [...] # Здесь должны быть ваши метки для
обучения
    model.fit(X, y, epochs=10, batch_size=32)
    # Генерация рекомендаций (пример)
    recommendations = {'Общее количество слоёв':
df['num_layers'].sum(), 'Общее количество компонентов':
df['num_components'].sum()}
    # Экспорт рекомендаций в документ
    export_to_doc(recommendations,
'recommendations.docx')
```

В ходе анализа возможности применения нейросетей для анализа данных из САД-программ был разработан фрагмент кода на языке программирования Python, который включает в себя ключевые

функции для анализа данных, получаемых из САПР файлов. Этот код охватывает такие аспекты, как загрузка ресурсных файлов, их детальный анализ и экспорт полученных рекомендаций в формате .doc. В ходе дальнейшей проработке, данный фрагмент кода может послужить основой для более сложного программного обеспечения и, при соответствующей доработке, способен преобразоваться в эффективное решение для подготовки производства многослойных печатных плат с использованием новейших технологий искусственного интеллекта.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гриднев В.Н., Кондаков Н.А., Трошина Д.П., Фатхутдинов Т.М. Анализ проектирования многослойных печатных плат // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-proektirovaniya-mnogosloynnyh-pechatnyh-plat> (23.02.2025).

2. Черемисин Д.Г., Мкртчян В.Р. Применение нейронных сетей на производстве печатных плат // Символ науки: международный научный журнал. 2023. № 6-2. С.32–33.

3. Ромащенко М.А., Васильченко Д.В., Пухов Д.А. Использование нейросетевых алгоритмов для визуального контроля топологии печатных плат // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 78-82.

УДК 621.311

**ОРЛОВ В.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ**

*Статья посвящена обоснованию разработки и моделированию гибридной системы охлаждения для фотоэлектрических модулей, сочетающей жидкостное и воздушное охлаждение. Результаты показывают, что система снижает среднюю температуру модуля с 75°C до 55°C, повышая его эффективность на 8–10%, что делает её перспективной для использования в солнечной энергетике, в том числе в жарких климатических условиях*

Солнечная энергия является ключевой при переходе к экологически чистой энергетике. Фотоэлектрические модули — это основные компоненты солнечных электростанций, но их эффективность сильно зависит от температуры. При каждом повышении температуры модуля на 10°C его эффективность снижается на 0,4–0,5%, что может привести к значительным потерям энергии, в особенности в жарком климате.

В данный момент для решения данной проблемы, активно ведутся разработки систем охлаждения, которые позволяют поддерживать оптимальную температуру модуля и повышать его производительность. Сейчас большинство существующих решений либо недостаточно эффективны, либо требуют значительных затрат энергии. В связи с этим разработка гибридных систем охлаждения, сочетающих преимущества различных подходов и обеспечивающих высокую энергоэффективность, является очень актуальной задачей.

#### *Цели и задачи исследования*

Цель данного исследования — это разработка и моделирование гибридной системы охлаждения для фотоэлектрических модулей для повышения эффективности за счет правильного управления температурой.

Основными целями исследования можно выделить:

1. Анализ существующие методов охлаждения фотоэлектрических модулей, а также их ограничения.
2. Рассмотреть конструкции гибридных систем охлаждения, сочетающих жидкостное и воздушное охлаждение.
3. Обзор тепловых процессов в фотоэлектрических модулях.
4. Подтверждение эффективности предлагаемой системы охлаждения.
5. Оценка экономической целесообразности внедрения гибридной системы.

#### *Обзор существующих решений*

Существующие методы охлаждения фотоэлектрических модулей можно разделить на пассивное охлаждение и активное охлаждение.

Пассивные системы охлаждения включают в себя естественную конвекцию, радиаторы и тепловые трубки. Такие методы просты в реализации и не требуют дополнительных затрат энергии, но их эффективность ограничена, особенно в условиях сильной солнечной радиации. Например, использование радиатора может снизить температуру модуля на 5–7%, что недостаточно в жарком климате [1].

Активные системы охлаждения используют для принудительной конвекции (вентиляторы), либо для жидкостного охлаждения

(циркуляция охлаждающего вещества). Такие системы могут эффективно снижать температуру, но для их работы требуется дополнительная энергия, но она снижает общую эффективность системы. Например, жидкостное охлаждение позволяет снизить температуру модуля на 15–20%, однако затраты энергии на работу насоса могут достигать до 5% от вырабатываемой электроэнергии. [2]

В последнее время активно изучаются гибридные системы, которые сочетают преимущества пассивных и активных методов. Например, жидкостное охлаждение в совокупности с принудительной конвекцией воздуха может значительно снизить температуру модуля, при этом одновременно минимизируя потребление энергии. В одном из исследований [3] была предложена гибридная система, которая помогла снизить температуру модуля на 18% и при этом одновременно увеличила эффективность на 10%. Однако разработка оптимальной конструкции и режимов работы таких систем остается актуальной задачей по сей день.

В связи с этим, разработка и внедрение гибридных систем охлаждения для фотоэлектрических модулей - важный шаг на пути повышения эффективности использования солнечной энергии и снижения себестоимости выработки электроэнергии.

#### *Методы и материалы предлагаемой системы*

Предлагаемая в данной статье гибридная система охлаждения состоит из двух основных компонентов, которые могут работать вместе для эффективного снижения температуры фотоэлектрических (PV) модулей:

##### 1. Жидкостное охлаждение:

Данная система представляет собой сеть медных трубок. Они расположены на расстоянии 10 см на задней стороне фотоэлектрического модуля, образуя катушку.

В роли теплоносителя может использоваться вода с добавлением 20% этиленгликоля для предотвращения замерзания. Для регулирования скорости циркуляции теплоносителя в диапазоне от 0,5 до 2,0 л/мин используется центробежный насос мощностью 12 Вт.

Охлаждающая жидкость поглощает избыточное тепло из модуля и передает его в теплообменник площадью поверхности 0,5 м<sup>2</sup>, где охлаждается за счет естественной конвекции.

##### 2. Воздушное охлаждение:

На задней поверхности модуля устанавливаются два вентилятора диаметром 120 мм для обеспечения принудительной конвекции воздуха.

Вентилятор работает в режиме переменной скорости (0-3000 об/мин) в зависимости от температуры модуля, которая измеряется термпарой.

Воздушное охлаждение дополняет жидкостное охлаждение, обеспечивая дополнительный отвод тепла в условиях сильного солнечного излучения.

*Сравнение эффективности гибридной системы и классических методов охлаждения*

Для оценки преимуществ гибридной системы были проведены сравнения с традиционными методами охлаждения: пассивным (естественная конвекция) и активным (с использованием жидкостного или воздушного охлаждения соответственно).

1. Пассивное охлаждение:

А) Естественная конвекция и теплоотводы дают снизить температуру модуля на 5–7%.

Б) В условиях проведения эксперимента средняя температура модуля составляет ~70°C.

В) Основными недостатками данной системы являются: неэффективность и отсутствие управляемости в жарком климате.

2. Активное жидкостное охлаждение:

А) Жидкостное охлаждение даёт возможность снизить температуру модуля на 10–15%.

Б) В условиях проведения эксперимента средняя температура составила 65°C.

В) Основными недостатками данной системы являются: Высокое энергопотребление при работе насоса (примерно 5% от вырабатываемой электроэнергии) и сложная конструкция.

3. Активное воздушное охлаждение:

А) Воздушное охлаждение снижает температуру модуля на 8–12%.

Б) В условиях проведения эксперимента средняя температура составила 68°C.

Основными недостатками данной системы являются: Шум вентилятора и зависимость результатов работы от скорости ветра.

4. Гибридное охлаждение:

А) Гибридные системы сочетают в себе преимущества жидкостного и воздушного охлаждения, позволяющая снизить температуру на 20–25%.

Б) В условиях проведения эксперимента средняя температура составила 55°C.

Преимущества данной системы:

А) Сохранение высокой эффективности даже при условиях сильного солнечного излучения.

Б) Возможность регулировки интенсивности охлаждения.

В) Снижение затрат на электроэнергию за счет оптимизации работы насосов и вентиляторов.



Рисунок 1 – Сравнение эффективности различных методов охлаждения

Примечания: пассивное – не эффективные, жидкостное - ввысокие затраты на электроэнергию, воздушное - зависит от скорости ветра, гибридное – сбалансированный.

Гибридная система охлаждения позволяет не только снижает температуру модуля, но и повышает его эффективность. Использование данной системы позволяет повысить эффективность модуля на 8–10 % по сравнению с режимом без охлаждения. Это обусловлено снижением потерь энергии из-за перегрева и более стабильной работой модулей в оптимальном температурном диапазоне.

Для наглядности и простоты понимания рассчитаем зависимость эффективности PV-модуля от температуры. Формула, описывающая снижение КПД при повышении температуры:

$$\eta(T) = \eta_{STC} \times [1 - \beta(T - T_{STC})],$$

где  $\eta(T)$  — эффективность при температуре  $T$ ,  $\eta_{STC}$  — эффективность в стандартных условиях,  $\beta$  — температурный коэффициент (обычно 0,004–0,005 для кремниевых модулей),  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$  (условная нулевая точка). Это лабораторный стандарт, который позволяет унифицировать измерения и прогнозировать КПД при нагреве.



Рисунок 2 – Зависимость эффективности от температуры

Уравнение теплового баланса для гибридной системы:

$$Q_{\text{солнечная}} = Q_{\text{электрическая}} + Q_{\text{тепловая}} + Q_{\text{охлаждения}},$$

где  $Q_{\text{солнечная}}$  – поглощённая солнечная энергия,  $Q_{\text{электрическая}}$  – преобразованная в электричество,  $Q_{\text{тепловая}}$  – тепловые потери,  $Q_{\text{охлаждения}}$  – энергия, отводимая системой охлаждения.

Рассчитаем параметры теплового баланса. В качестве исходных данных возьмём усредненные параметры. Мощность солнечного излучения:  $G=1000$  Вт/м<sup>2</sup>. Площадь модуля:  $A=1$  м<sup>2</sup>,  $A=1$  м<sup>2</sup> (для упрощения), КПД модуля (STC):  $\eta_{\text{STC}} = 16\%$

Температура модуля приведены далее. Без охлаждения:  $T_{\text{hot}} = 25^{\circ}\text{C}$ . С гибридным охлаждением:  $T_{\text{cool}} = 25^{\circ}\text{C}$ . Энергопотребление системы:  $P_{\text{cool}} = 18$  Вт. Температурный коэффициент:  $\beta = 0.004$ .

Перейдем к расчетной части. Поглощённая солнечная энергия:  $Q_{\text{солнечная}} = G \times A = 1000$  Вт. Электрическая мощность ( $Q_{\text{электрическая}}$ ) может быть определена по следующим формулам.

КПД зависит от температуры:  $\eta(T) = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta(T - T_{\text{STC}})]$ .

Рассчитаем для  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

$$\eta(25) = 16\% \times [1 - 0.004 \times (25 - 25)] = 16\% \times 1 = 16\%$$

$$Q_{\text{электрическая}} = 1000 \text{ Вт} \times 16\% = 160 \text{ Вт}$$

Рассчитаем для  $T = 55^{\circ}\text{C}$ :

$$\eta(55) = 16\% \times [1 - 0.004 \times (55 - 25)] = 16\% \times 0.88 = 14.08\%$$

$$Q_{\text{электрическая}} = 1000 \text{ Вт} \times 14.08\% = 140.8 \text{ Вт}$$

Далее нам необходимо рассчитать тепловые потери.

Оценим через естественную конвекцию и излучение. Для этого

нам нужно уточнить некоторые аспекты:  $T_{\text{воздуха}} = 30^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon \approx 0.9$ .

Расчет для  $T_{\text{модуль}} = 75^\circ\text{C}$ :

$$Q_{\text{тепловая}} = 5 \times (75 - 30) + 5.67 \times 10 - 8 \times 0.9 \times [(75 + 273)4 - (30 + 273)4] = 225 + 198 = 577 \text{ Вт}$$

Расчет для  $T_{\text{модуль}} = 55^\circ\text{C}$ :

$$Q_{\text{тепловая}} = 5 \times (55 - 30) + 5.67 \times 10 - 8 \times 0.9 \times [(55 + 273)4 - (30 + 273)4] = 225 + 198 = 323 \text{ Вт}$$

Энергия, отводимая системой охлаждения ( $Q_{\text{охлаждения}}$ ):

$$Q_{\text{охлаждения}} = Q_{\text{солнечная}} - Q_{\text{электрическая}} - Q_{\text{тепловая}}$$

Без охлаждения:  $Q_{\text{охлаждения}} = 1000 - 128 - 57 = 295 \text{ Вт}$

С гибридным охлаждением:

$$Q_{\text{охлаждения}} = 1000 - 140.8 - 323 = 536.2 \text{ Вт}$$

В это входит: 18 Вт, что является затратами на работу насоса и вентиляторов, а оставшиеся 518.2 Вт – полезный отвод тепла.

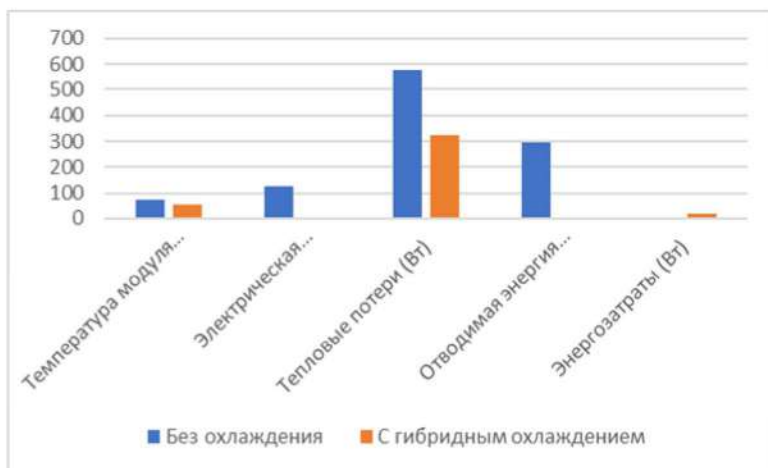


Рисунок 3 – Результаты расчетов для разных типов охлаждения

*Потребление энергии системой охлаждения*

Энергопотребление гибридной системы охлаждения составляет 18 Вт, что сопоставимо 1,8% от мощности модуля (около 100 Вт).



Однако при повышении эффективности на 8–10% могло бы компенсировать эти затраты, сделав систему экономически эффективной.



Рисунок 4 – Зависимость потребления энергии и эффективности

#### Результаты и выводы

- Гибридная система охлаждения позволяет обеспечивать значительные преимущества в отличие от традиционных методов, снижая температуру модулей на 20–25%.

- Энергопотребление системы составляет примерно 1,8% от мощности модуля, что компенсируется значительным ростом КПД.

- Повышение эффективности модулей на 8–10% делает гибридные системы значительно экономически привлекательными.

- Экспериментальные данные подтверждают необходимость дальнейшей разработки гибридной системы охлаждения.

Многочисленные результаты моделирования и экспериментальных исследований подтверждают высокую эффективность предлагаемой гибридной системы охлаждения фотоэлектрических модулей.

Гибридная система позволяет снизить среднюю температуру модуля с 75°C до 55°C, что на 20–25% эффективнее, чем классические методы охлаждения. Это происходит благодаря комбинированному эффекту жидкостного и воздушного охлаждения, которые дополняют друг друга.

Повышение эффективности модуля на 8–10 % свидетельствует о том, что более низкие температуры оказывают прямое влияние на производительность фотоэлектрического модуля. Это особенно важно в жарком климате, поскольку перегрев является основной причиной снижения эффективности.

Несмотря на то, что гибридная система потребляет 18 Вт (1,8% от мощности модуля), повышение эффективности компенсирует эти затраты, делая систему экономически эффективной.

Преимущества данной системы:

- Высокая эффективность: система значительно снижает температуру модуля, чем повышает её эффективность.
- Адаптивность: интенсивность охлаждения можно регулировать в зависимости от температуры модуля и внешних условий.
- Универсальность: Систему можно адаптировать для использования в различных климатических условиях.
- Долговечность: при более низких температурах, на модулях снижается термическая нагрузка, тем самым увеличивается срок службы фотоэлектрических модулей.

Недостатки данной системы:

- Энергозатраты: системе требуется дополнительная энергия для работы компонентов системы (насосы и вентиляторы), что имеет решающее значение для автономных установок.
- Сложность конструкции: слияние жидкостного и воздушного охлаждения усложняет систему и требует дополнительного обслуживания.
- Стоимость: гибридные системы обходятся дороже в производстве и установке, чем классические методы охлаждения.

Возможности дальнейшего улучшения системы включают:

- Оптимизация потребления энергии: применение энергоэффективных насосов и вентиляторов или внедрение системы управления на основе искусственного интеллекта (ИИ), для минимизации затрат на электроэнергию.
- Использование альтернативных теплоносителей: аккумулирование тепла с использованием материалов с фазовым переходом (PCM).
- Упрощение конструкции: разработка модульных систем, которые можно легко установить на существующие фотоэлектрические модули, или использование легких и недорогих материалов для снижения стоимости системы.
- Объединение с другими технологиями: объединение гибридных системы охлаждения с системами хранения энергии (к примеру аккумуляторы) для повышения автономности системы или использование избыточного тепла для поддержания работы побочных систем, например, для нагрева воды или отопления помещений.

Таким образом, целью данного исследования являлось последующая разработка и моделирование гибридной системы охлаждения для фотоэлектрических (PV) модулей, которая объединяет в себе преимущества жидкостного и воздушного охлаждения.

Основные выводы данного исследования можно резюмировать следующим образом.

Гибридная система охлаждения способна снизить среднюю температуру фотоэлектрических панелей с 75°C до 55°C, что на 20–25% лучше традиционных методов охлаждения. При увеличении эффективности модуля на 8–10 % происходит снижение температуры, что напрямую влияет на производительность системы.

Гибридные системы эффективнее пассивного, жидкостного и воздушного охлаждения, что обеспечивает более равномерное распределение температуры и снижают тепловую нагрузку. Потребление системой энергии (18 Вт) компенсируется значительным повышением эффективности, что делает ее экономически более выгодной в сравнении с классическими методами.

Экспериментальные данные показали хорошую эффективность предложенной системы. Она способна снизить температуру на 20°C в сравнении с отсутствием охлаждения и на 10–15°C относительно пассивных/активных методов. Эксперименты подтверждают, что гибридная система позволяет эффективно применять в условиях высокой солнечной радиации.

Основное преимущество данной системы — это высокая эффективность, адаптивность и универсальность. Недостатки связаны лишь с энергопотреблением, сложностью конструкции и стоимостью, что может решиться дальнейшей оптимизацией.

Предложенная и рассмотренная гибридная система охлаждения представляет собой большой практический интерес для солнечной энергетики, особенно это применительно в регионах с жарким климатом, где перегрев фотоэлектрических модулей является основной причиной потери эффективности.

Внедрение гибридных систем позволят увеличить выработку энергии на 8–10%. Позволяет поддерживать низкие температуры модуля, а также продлевает срок его службы, и сокращает затраты на замену и обслуживание.

Несмотря на дополнительные затраты на установку и эксплуатацию системы, повышение эффективности и долговечности модулей это делает ее экономически оправданной. Повышение эффективности фотоэлектрических панелей может помочь увеличить долю возобновляемой энергии и сократить выбросы CO<sub>2</sub>.

В окончании, хотелось бы сказать, что предложенная гибридная система охлаждения имеет высокую эффективность и практическую значимость для повышения производительности фотоэлектрических модулей. Комбинированный подход к охлаждению позволяет не только снизить температуру компонентов, но и повысить их эффективность, что делает систему перспективной для широкого использования в солнечной энергетике. Дальнейшие исследования и оптимизация этой системы позволяют сделать ее более эффективной и применимой в различных условиях.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ван Л. и др. Гибридные системы охлаждения для солнечных панелей: обзор. Преобразование энергии и управление. 2019. 180. С. 1-12.
2. Кумар Р. Управление температурой фотоэлектрических модулей с использованием жидкостного охлаждения. Материалы и солнечные элементы солнечной энергии. 2012. 220. С. 110-120.
3. Али Х. Повышение эффективности фотоэлектрических модулей с использованием гибридных систем охлаждения. Журнал технологий чистой энергии. 2022. 10(2). С. 45-52.

УДК 004.896

**ПЕТРОВ Р.С.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### РАЗРАБОТКА ПОРТАТИВНОГО ГРАФИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ARDUINO

*В статье рассматривается разработка портативного графического модуля на базе микроконтроллера Arduino, ориентированного на отображение информации в компактных и энергоэффективных электронных устройствах. Описаны ключевые аспекты проектирования, включая выбор дисплеев (LCD, OLED, TFT), построение графического конвейера, реализацию энергоэффективных решений, поддержку интерфейсов связи (I2C, SPI, UART, Bluetooth, Wi-Fi) и методы обеспечения надёжности.*

Современные портативные устройства требуют компактных и энергоэффективных решений для отображения графической информации. Графические модули на базе Arduino представляют собой доступное и гибкое решение для проектов, связанных с визуализацией данных, интерфейсами управления или

интерактивными системами. Такие модули находят применение в носимой электронике, медицинских устройствах, промышленных панелях управления и других областях.

*Основные задачи портативного графического модуля на базе Arduino*

- Основной задачей при создании графического модуля является обеспечение стабильного и качественного отображения информации. Для этого необходимо тщательно подобрать тип дисплея, учитывая такие параметры как энергопотребление, разрешение, угол обзора и условия эксплуатации. LCD-дисплеи отличаются низким энергопотреблением и хорошей читаемостью при солнечном свете, но ограничены в графических возможностях. OLED-экраны обеспечивают высокий контраст и широкие углы обзора, но требуют мер защиты от выгорания. TFT-дисплеи предлагают полноцветное изображение, но значительно нагружают микроконтроллер.

- Важнейшим аспектом разработки является создание эффективного графического конвейера. Это включает реализацию системы буферизации с использованием двойного буфера для устранения мерцания, разработку алгоритмов отрисовки графических примитивов (линий, окружностей, заполнения областей), а также создание гибкой системы вывода текста с поддержкой различных шрифтов и кодировок. Особое внимание уделяется оптимизации использования ограниченных ресурсов микроконтроллера.

- Энергоэффективность - ключевое требование к портативным устройствам. На аппаратном уровне это достигается за счёт динамического управления питанием, регулировки напряжения подсветки и использования режимов глубокого сна. На программном уровне применяются адаптивные алгоритмы, изменяющие частоту обновления в зависимости от активности и интеллектуально управляющие подсветкой. Важную роль играет оптимизация кода для минимизации энергозатрат.

- Для интеграции модуля в различные системы необходимо обеспечить поддержку различных интерфейсов связи. Широко используются I2C и SPI для подключения датчиков, UART для обмена данными с другими устройствами, а также беспроводные технологии типа Bluetooth и Wi-Fi. Особое внимание уделяется разработке универсального API, позволяющего легко адаптировать модуль под конкретные задачи.

- Качество отображения напрямую зависит от тщательной калибровки дисплея. Это включает настройку цветопередачи, коррекцию геометрии изображения, тестирование углов обзора и

адаптацию к различным условиям освещения. Для промышленных применений дополнительно учитываются требования по устойчивости к вибрациям, перепадам температур и другим внешним факторам.

- Производительность системы обеспечивается за счёт грамотного распределения ресурсов микроконтроллера, использования аппаратного ускорения (например, DMA для передачи данных) и оптимизации алгоритмов отрисовки. Важно найти баланс между качеством изображения и быстродействием, особенно при работе с анимацией и динамически изменяющимися данными.

- Надёжность работы в различных условиях достигается путём реализации механизмов защиты от помех, обработки ошибок и автоматического восстановления после сбоев. Для критически важных применений разрабатываются схемы резервирования и дублирования ключевых компонентов.

- Перспективы развития таких модулей связаны с внедрением сенсорного ввода, поддержкой векторной графики, интеграцией с облачными сервисами и использованием более мощных микроконтроллеров. Особый интерес представляет сочетание графических возможностей с технологиями машинного обучения для создания интеллектуальных интерфейсов.

*Основные компоненты графического модуля на базе Arduino*

1. Центральный управляющий модуль (микроконтроллер Arduino).

В качестве центрального элемента системы выступает микроконтроллер семейства Arduino, выбор конкретной модели которого определяется требованиями проекта. Arduino Uno R3 представляет собой базовый вариант с микроконтроллером ATmega328P, обладающий 32 КБ флэш-памяти и 2 КБ ОЗУ. Оптимален для простых графических решений с использованием монохромных дисплеев и минимальным набором периферии. Основные преимущества включают низкую стоимость, простоту программирования и обширную комьюнити поддержку. Arduino Nano сохраняет функциональность Uno в компактном форм-факторе (45×18 мм), что критически важно для портативных устройств. Модуль оснащен стабилизатором напряжения и полноценным USB-интерфейсом, потребляя при этом всего 19 мА в активном режиме. Особенно востребован в носимой электронике и компактных измерительных приборах. Arduino Mega 2560 на базе ATmega2560 с 256 КБ флэш-памяти становится необходимым при работе с цветными TFT-дисплеями высокого разрешения (до 480×320 пикселей) и сложными графическими интерфейсами. Дополнительные 54

цифровых ввода/вывода позволяют подключать расширенную периферию без использования мультиплексоров. ESP32-совместимые платы (например, ESP32 DevKitC) выходят за рамки классической Arduino-архитектуры, предлагая двухъядерный процессор с тактовой частотой до 240 МГц, встроенные Bluetooth и Wi-Fi модули, а также аппаратное ускорение графики. Становятся предпочтительным выбором для проектов, требующих беспроводной связи и продвинутой графической обработки.

2. Сравнительный анализ дисплейных модулей.

Выбор технологии отображения определяет ключевые характеристики всего устройства и должен осуществляться на основе конкретных требований проекта.

2.1. Монохромные LCD-дисплеи отличаются ультранизким энергопотреблением (0.5-2 мА) и отличной читаемостью при прямом солнечном свете. Типичное разрешение составляет 128×64 или 192×64 пикселей при контрастности 1:10.

2.2. OLED-матрицы предлагают значительно лучшие характеристики: разрешение до 128×128 пикселей, контрастность 1,000,000:1, время отклика менее 1 мс. Их ключевые преимущества включают широкие углы обзора (до 170°), минимальную толщину (менее 1 мм) и поддержку частичного обновления.

2.3. Цветные TFT-экраны представляют наиболее продвинутое решение с разрешением 240×320 (QVGA) или 480×320 пикселей и цветопередачей 16-24 бит. Они поддерживают частоту обновления 30-60 Гц и часто оснащаются сенсорным вводом (резистивным или ёмкостным). Основными недостатками являются высокое энергопотребление (80-150 мА) и повышенные требования к производительности микроконтроллера.

3. Система энергоснабжения и управления питанием.

Для портативных решений наиболее распространены литий-ионные аккумуляторы 18650 (3.7В, 2000-3500 мАч), обеспечивающие 4-8 часов работы TFT-дисплея. В компактных носимых устройствах часто применяют LiPo-батареи (20-100 мАч) благодаря их малому весу и габаритам. В качестве дополнительного источника энергии могут использоваться солнечные панели (5В, 100-200 мА), особенно в уличных и автономных системах. Эффективное управление питанием требует применения DC-DC преобразователей с КПД более 90% (например, LM2596 для понижения напряжения). Для подсветки дисплея используют импульсные стабилизаторы тока, обеспечивающие равномерную яркость при минимальных потерях энергии. Обязательным элементом являются схемы защиты от переразряда

(DW01 + FS8205), продлевающие срок службы аккумуляторов. Особое внимание уделяется реализации многоуровневых режимов энергосбережения, позволяющих значительно увеличить автономность устройства.

#### 4. Периферийные модули и интерфейсы связи.

Датчики и устройства ввода. Для создания интерактивных интерфейсов применяют акселерометры/гироскопы (MPU-6050), позволяющие реализовать жестовое управление. Датчики освещённости (BH1750) автоматически регулируют яркость дисплея в зависимости от условий окружающей среды. В современных сенсорных интерфейсах используют резистивные/ёмкостные сенсорные панели с точностью до 4096×4096 точек, обеспечивающие точное позиционирование. Для связи со смартфонами и другими устройствами применяют Bluetooth Low Energy (nRF24L01), отличающийся низким энергопотреблением. Wi-Fi модули (ESP8266) обеспечивают интеграцию с облачными сервисами и удалённое управление.

#### 5. Механические и конструктивные элементы.

Для большинства прототипов и серийных устройств применяют 3D-печатные корпуса из ABS/PLA пластика, позволяющие быстро реализовать любую форму. В промышленных условиях предпочтение отдают алюминиевым экранированным корпусам, обеспечивающим защиту от помех и механических воздействий. Для работы в сложных условиях окружающей среды разрабатывают влагозащищённые исполнения (IP54-IP67). В зависимости от области применения используют различные решения: магнитные крепления для автомобильных применений, накладные рамки с защитным стеклом для уличных устройств, поворотные механизмы для изменения ориентации дисплея.

#### 6. Программное обеспечение и библиотеки

Для базовой графики наиболее популярна Adafruit GFX, предлагающая широкий набор примитивов. Современные решения включают аппаратно-ускоренные алгоритмы вывода, значительно снижающие нагрузку на процессор. Кэширование графических элементов уменьшает время отклика интерфейса и экономит энергию.

Преимущества графического модуля на базе Arduino делают его особенно привлекательным для разработчиков, студентов, инженеров и энтузиастов, занимающихся созданием встраиваемых и портативных систем. Такие модули сочетают в себе простоту реализации, гибкость настройки и доступность компонентов, что позволяет применять их в



самых разнообразных сферах — от приборостроения до носимой электроники и образовательных проектов.

Одним из важнейших преимуществ является низкая стоимость системы. Компоненты, используемые при создании графического модуля — такие как микроконтроллеры Arduino, OLED или TFT-дисплеи, модули питания и устройства ввода — доступны на рынке по демократичным ценам. Благодаря популярности Arduino и его совместимых плат, можно легко найти бюджетные варианты оборудования, которые при этом обеспечивают достойный функционал. Это особенно важно для образовательных учреждений, стартапов и индивидуальных разработчиков с ограниченными ресурсами.

Еще одним ключевым достоинством является простота сборки и программирования. Платформа Arduino известна своей дружелюбностью к новичкам. Использование среды Arduino IDE, наличие многочисленных библиотек и обширного сообщества позволяют быстро начать разработку даже тем, кто не имеет глубоких знаний в электронике или программировании. Большинство дисплеев и сенсорных модулей поддерживаются готовыми библиотеками, что значительно упрощает создание графических интерфейсов.

Гибкость и масштабируемость архитектуры позволяют адаптировать графический модуль под конкретные задачи. В зависимости от требований проекта можно легко изменить размер дисплея, способ управления (кнопки или сенсор), добавить модули беспроводной связи (Wi-Fi, Bluetooth) или дополнительные датчики. Это делает систему удобной для прототипирования и последующего масштабирования в более сложные продукты.

Особое внимание стоит уделить энергоэффективности и автономности. Arduino-платформы и современные дисплеи (особенно OLED и e-paper) потребляют сравнительно мало энергии, что позволяет создавать устройства с длительным временем автономной работы.

Также стоит отметить модульность конструкции. Благодаря использованию стандартных интерфейсов подключения (I2C, SPI, UART), можно легко заменять компоненты, не перепроектируя всю систему. Например, можно заменить дисплей на другой с более высоким разрешением или поменять тип микроконтроллера, не меняя основную логику работы.

Первым и наиболее значимым ограничением является ограниченная вычислительная мощность. Большинство популярных моделей Arduino (например, Uno, Nano, Mini) основаны на 8-битных

микроконтроллерах с тактовой частотой 16 МГц и объемом оперативной памяти всего в несколько килобайт. Такие характеристики затрудняют реализацию сложных графических интерфейсов, особенно с использованием цветных TFT-дисплеев, требующих высокой пропускной способности и быстрой обработки графики. Обновление экрана может происходить с заметными задержками, особенно при выводе анимации или больших объемов данных.

Следующее существенное ограничение — недостаток оперативной и флеш-памяти. Графические интерфейсы, шрифты, иконки и изображения занимают значительный объем памяти. Даже при использовании PROGMEM (размещения данных во флеш-памяти) программисту приходится тщательно оптимизировать каждый элемент интерфейса. При попытке реализовать сложную логику интерфейса вместе с отображением графики можно легко столкнуться с исчерпанием памяти, что приведет к сбоям, зависаниям и невозможности загрузки новых функций.

Еще один недостаток связан с ограниченным количеством интерфейсных пинов. Подключение дисплея, сенсорного контроллера, SD-карты, кнопок и других периферийных устройств может быстро исчерпать доступные входы/выходы Arduino. Это особенно критично при использовании Arduino Uno или Nano, которые имеют относительно небольшое количество пинов. Конечно, можно применять расширители портов или переходить на более мощные платформы (например, Arduino Mega или STM32), но это усложняет разработку и повышает стоимость проекта.

Также стоит отметить чувствительность к электромагнитным помехам и нестабильному питанию, особенно при использовании TFT-дисплеев, которые могут потреблять значительный ток при высокой яркости подсветки. Без качественной стабилизации питания возможны сбои в отображении информации, артефакты на экране или перезагрузки микроконтроллера.

Наконец, недостатки платформы Arduino как таковой тоже оказывают влияние. Несмотря на свою популярность и удобство, она не предназначена для сложных проектов, требующих высокой надежности, многозадачности или параллельной обработки данных. Отсутствие полноценной операционной системы, поддержки многопоточности и ограниченный инструментарий для отладки делают работу с графикой более трудоемкой по сравнению с более мощными платформами (ESP32, Raspberry Pi и др.).

Таким образом, разработка графического модуля на базе микроконтроллера Arduino представляет собой эффективное,

экономичное и универсальное решение для создания пользовательских интерфейсов в широком спектре электронных устройств. Благодаря своей модульности, доступности и простоте в освоении, такие модули успешно применяются как в учебных проектах, так и в реальных инженерных разработках. Возможность быстрого прототипирования и гибкой настройки аппаратной части делает платформу Arduino привлекательной как для начинающих разработчиков, так и для профессионалов.

В заключение можно сказать, что при грамотном подходе к проектированию и разумной оценке возможностей платформы Arduino, графический модуль становится мощным инструментом для реализации интуитивных, информативных и наглядных интерфейсов, удовлетворяющих требованиям как простых, так и функционально насыщенных электронных систем.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шадронов, А. И. Микроконтроллеры Arduino: теория и практика : учебное пособие / А. И. Шадронов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2021. – 350 с.
2. Макарова, Н. А., Орлов, П. А. Практическое руководство по Arduino / Н. А. Макарова, П. А. Орлов. – Москва : ДМК Пресс, 2020. – 288 с.
3. Петин, В. В. Практическая энциклопедия Arduino : энциклопедия / В. В. Петин, А. А. Биняковский. – 2-ое изд., испр. и доп. – Москва : ДМК Пресс, 2020.
4. Козадеров, О. А. Современные химические источники тока : учебное пособие / О. А. Козадеров, А. В. Введенский. – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 132 с.

УДК 004.021

### ПРОКОФЬЕВ А.В.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ТРАССИРОВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

*В статье рассматривается анализ и сравнение современных алгоритмов трассировки многослойных печатных плат. Рассматриваются критерии оценки качества трассировки и влияние алгоритмов на целостность сигналов.*

Многослойные печатные платы (МПП) играют ключевую роль в современной электронике, обеспечивая основу для все более плотного размещения компонентов и реализации сложных электронных систем. Постоянное увеличение функциональности электронных устройств ведет к росту числа компонентов и связей между ними, что, в свою очередь, требует использования многослойных структур для эффективной коммутации. Процесс проектирования МПП включает в себя множество этапов, среди которых трассировка, то есть прокладка электрических соединений между компонентами, является одним из наиболее критичных и сложных. Эффективность и качество трассировки напрямую влияют на производительность, надежность и стоимость конечного электронного изделия.

Сложность трассировки МПП обусловлена необходимостью учета множества факторов, таких как высокая плотность компонентов и выводов, ограничения по длине проводников, минимизация перекрестных помех, обеспечение целостности сигналов, эффективное распределение питания и отвод тепла. Ручная трассировка таких сложных плат становится чрезвычайно трудоемкой. В связи с этим, разработка и применение автоматизированных алгоритмов трассировки являются неотъемлемой частью современных систем автоматизированного проектирования печатных плат (САПР).

Целью данной работы является подробный анализ и сравнение современных алгоритмов трассировки, применяемых для многослойных печатных плат. В ней будут рассмотрены принципы работы и особенности различных типов алгоритмов, критерии оценки качества трассировки, их сильные и слабые стороны применительно к МПП, влияние на целостность сигналов и тепловые характеристики, последние достижения и тенденции в данной области, а также примеры практического применения в современных САПР.

Для систематического понимания многообразия существующих алгоритмов трассировки печатных плат целесообразно провести их классификацию по различным признакам. Одним из основных разделений является уровень детализации: алгоритмы глобальной трассировки определяют общие маршруты соединений, не вдаваясь в геометрические подробности, в то время как алгоритмы детальной трассировки прокладывают конкретные проводники с учетом всех проектных ограничений [2]. Некоторые современные подходы стремятся к интеграции этих двух этапов для достижения более оптимальных результатов [3].

Другой важной классификацией является принцип работы с соединениями: последовательные алгоритмы трассируют цепи одну за

другой, в то время как параллельные (или конкурентные) алгоритмы пытаются оптимизировать трассировку всех цепей одновременно. Кроме того, алгоритмы могут быть классифицированы по типу рабочего пространства: grid-based алгоритмы используют дискретную сетку для представления платы, а gridless алгоритмы работают в непрерывном пространстве [4]. Наконец, можно выделить детерминированные алгоритмы, результат работы которых однозначно определяется входными данными, и вероятностные алгоритмы, использующие случайные элементы в процессе поиска решения [3]. В дальнейшем будут подробно рассмотрены такие распространенные типы алгоритмов, как лабиринтные, каналные, графовые, алгоритмы с удалением и повторной трассировкой, а также алгоритмы, учитывающие форму проводников.

Рассмотрим современные алгоритмы трассировки многослойных печатных плат, их принципы работы и особенности

#### *Алгоритмы на основе лабиринтов (Maze-based Algorithms)*

Алгоритмы на основе лабиринтов представляют собой фундаментальный подход к поиску пути на дискретной сетке, моделирующей печатную плату. Эти алгоритмы, как правило, используют методы поиска в ширину или в глубину для нахождения соединения между двумя точками.

*Алгоритм Ли (Lee's algorithm)* является одним из первых и наиболее известных лабиринтных алгоритмов. Он гарантирует нахождение кратчайшего пути на сетке, если такой путь существует [4]. Алгоритм работает в три этапа: распространение волны от начальной точки, обратный ход для определения пути и очистка сетки. Каждый шаг алгоритма требует значительных вычислительных ресурсов и памяти, особенно для больших и сложных плат. Несмотря на это, алгоритм Ли может применяться на начальных этапах трассировки или для трассировки критически важных цепей [4].

*Алгоритм A\** представляет собой усовершенствование алгоритма Ли, использующее эвристическую функцию для оценки перспективности различных путей [3]. Эвристика позволяет алгоритму A\* более эффективно исследовать пространство поиска, сокращая время выполнения и объем используемой памяти. Выбор эвристической функции играет ключевую роль в производительности алгоритма и может быть настроен для оптимизации трассировки по различным критериям, таким как минимизация количества переходных отверстий или длины проводников [5].

Применение базовых лабиринтных алгоритмов к многослойным печатным платам сопряжено с увеличением размерности пространства

поиска и необходимостью учета переходных отверстий для соединения трасс между слоями [4]. Это приводит к еще большему росту вычислительной сложности. Для решения этой проблемы разрабатываются различные оптимизации и вариации лабиринтных алгоритмов, учитывающие специфику многослойной трассировки.

#### *Канальные алгоритмы (Channel Algorithms)*

Канальные алгоритмы применяются для трассировки в предварительно определенных прямоугольных областях (каналах) между рядами или столбцами компонентов [5]. Традиционно в канальной трассировке используется двухслойный подход: один слой предназначен для горизонтальных проводников, а другой – для вертикальных.

Основным преимуществом канальных алгоритмов является их относительно высокая скорость и эффективность в условиях структурированной трассировочной области. Однако для многослойных печатных плат с произвольным размещением компонентов, где трассировочные области не имеют четкой структуры, применение классических канальных алгоритмов ограничено [5]. Принципы канальной трассировки могут быть использованы в отдельных областях МПП, но для общей задачи трассировки требуются более гибкие подходы.

#### *Алгоритмы на основе графов (Graph-based Algorithms)*

Алгоритмы на основе графов моделируют задачу трассировки печатной платы с использованием теории графов. Рабочее пространство платы представляется в виде графа, где узлы могут соответствовать ячейкам сетки, а ребра – возможным соединениям между соседними ячейками, включая переходы между слоями через переходные отверстия [2].

В качестве альтернативы традиционным прямоугольным сеткам могут использоваться треугольные сетки, которые потенциально обеспечивают более эффективные решения, особенно для трассировки под произвольными углами [2]. На графах, представляющих трассировочное пространство, могут применяться алгоритмы поиска кратчайшего пути, такие как алгоритм Дейкстры или алгоритм Беллмана-Форда. Кроме того, для решения задачи глобальной трассировки могут использоваться алгоритмы максимального потока.

Для представления трассировочных ресурсов и ограничений могут использоваться графы связности. Современные подходы часто комбинируют различные графовые алгоритмы. Например, для глобальной трассировки может применяться поиск по дереву Монте-Карло (MCTS), за которым следует детальная трассировка с

использованием алгоритма A\*[3] . Такой двухэтапный подход позволяет эффективно решать сложные задачи трассировки МПП.

*Алгоритмы с удалением и повторной трассировкой (Rip-andRerouteAlgorithms)*

Алгоритмы с удалением и повторной трассировкой являются итеративным подходом к решению задачи трассировки. На начальном этапе все цепи трассируются с использованием некоторого базового алгоритма (часто лабиринтного). Затем анализируются результаты трассировки на предмет наличия перегруженных областей или нарушений правил проектирования. Проблемные соединения удаляются (rip-up), и предпринимается попытка их повторной трассировки с использованием других параметров или в другом порядке.

Итеративный характер этого подхода позволяет избежать локальных оптимумов и достичь более высокого процента завершения трассировки, особенно в сложных проектах. Эффективность алгоритмов с удалением и повторной трассировкой во многом зависит от стратегии выбора цепей для повторной трассировки, порядка их трассировки и используемых функций стоимости [2]. В процессе повторной трассировки часто используются лабиринтные алгоритмы, такие как алгоритм Ли. Существуют гибридные подходы, комбинирующие удаление и повторную трассировку с другими методами оптимизации, например, с итеративным удалением [5].

*Алгоритмы, учитывающие форму проводников (Algorithms Considering Conductor Shape)*

Традиционные grid-based алгоритмы имеют ограничения в точном представлении и оптимизации формы проводников. *Gridless алгоритмы* работают в непрерывном пространстве и позволяют создавать трассы с более гибкой геометрией, включая произвольные углы и переменную ширину.

*Топологическая трассировка*, поддерживаемая gridless алгоритмами, позволяет прокладывать соединения под любым углом, что может привести к сокращению длины проводников и уменьшению количества переходных отверстий. Учет формы проводников особенно важен для обеспечения целостности сигналов в высокоскоростных проектах, где критичными являются контроль импеданса и минимизация перекрестных помех. Алгоритмы, поддерживающие неманхэттенскую трассировку (с использованием углов 45 градусов), могут способствовать уменьшению длины проводников и повышению эффективности трассировки [1]. Кроме того, существуют алгоритмы, способные работать с переменной шириной проводников для

удовлетворения требований по импедансу и токовой нагрузке [5]. Переход к gridless подходам обеспечивает большую свободу в проектировании трасс и позволяет оптимизировать электрические характеристики платы.

Рассмотрим критерии оценки качества трассировки многослойных печатных плат.

Качество трассировки многослойных печатных плат оценивается по ряду ключевых критериев, отражающих как эффективность работы алгоритма, так и качество полученного результата. К ним относятся:

- Процент завершения трассировки (Completion Rate) – доля успешно трассированных электрических соединений (цепей) без нарушений правил проектирования. Высокий процент завершения является первостепенной целью любого алгоритма трассировки.

- Длина проводников (TraceLength) – общая длина всех проложенных соединений. Меньшая длина проводников обычно предпочтительна для снижения задержек сигналов и потенциальных помех.

- Количество переходных отверстий (Виа) (Number of Vias) – число переходных отверстий, используемых для соединения трасс между различными слоями. Их минимизация позволяет снизить стоимость производства, улучшить целостность сигналов и повысить надежность платы.

- Вычислительная сложность и время выполнения алгоритма (Computational Complexity and Runtime) – объем ресурсов (времени и памяти), необходимых алгоритму для трассировки печатной платы. Эффективность алгоритма критически важна для обработки больших и сложных проектов.

- Соблюдение правил проектирования (Design Rule Compliance) – способность алгоритма следовать всем заданным правилам проектирования, таким как минимальная ширина проводников, зазоры между ними и контактными площадками.

- Минимизация перекрестных помех (Crosstalk Minimization) – эффективность алгоритма в снижении нежелательной электромагнитной связи между соседними проводниками.

- Обеспечение целостности сигналов (Signal Integrity) – способность алгоритма создавать трассировку, обеспечивающую качество электрических сигналов при их распространении по плате.

- Управление тепловыделением (Heat Dissipation Management) – учет алгоритмом тепловых аспектов, таких как размещение термовиа и слоев питания/земли для отвода тепла.



- Максимальная загруженность (MaximumCongestion) – наивысшая плотность трасс в любой области трассировки, указывающая на потенциальные узкие места.

- Средняя загруженность (AverageCongestion) – средняя плотность трасс по всей области трассировки, коррелирующая с общей длиной проводников.

Эффективная оценка алгоритмов трассировки требует учета всех этих критериев, поскольку оптимизация по одному из них может негативно сказаться на других. Важность каждого критерия может варьироваться в зависимости от конкретного приложения и требований к производительности разрабатываемого электронного устройства.

Подводя итог, для лучшего понимания критериев качества трассировки многослойных печатных плат, составим таблицу 1.

Таблица 1 – Критерии оценки качества трассировки многослойных печатных плат

<b>Критерий</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>
Процент завершения трассировки (Completion Rate)	Доля успешно трассированных соединений	Основной показатель успешности трассировки
Длина проводников (Trace Length)	Общая длина всех трасс	Влияет на задержку сигнала и электромагнитные помехи
Количество переходных отверстий (Виа) (Number of Vias)	Число виа для межслойных соединений	Влияет на стоимость, надежность и целостность сигнала
Вычислительная сложность и время выполнения алгоритма (ComputationalComplexity and Runtime)	Требуемые ресурсы и время работы алгоритма	Определяет возможность применения для больших проектов
Соблюдение правил проектирования (Design Rule Compliance)	Соответствие трассировки заданным ограничениям	Обеспечивает технологичность и работоспособность платы

Минимизация перекрестных помех (Crosstalk Minimization)	Снижение электромагнитной связи между трассами	Критично для высокоскоростных и аналоговых схем
Обеспечение целостности сигналов (Signal Integrity)	Качество передачи сигналов по трассам	Важно для корректной работы высокоскоростных цифровых схем
Управление тепловыделением (Heat Dissipation Management)	Учет тепловых аспектов при трассировке	Необходимо для предотвращения перегрева компонентов
Максимальная загруженность (Maximum Congestion)	Наивысшая плотность трасс в области	Указывает на потенциальные проблемы при детальной трассировке
Средняя загруженность (Average Congestion)	Средняя плотность трасс	Коррелирует с общей длиной проводников

Различные алгоритмы трассировки обладают своими сильными и слабыми сторонами применительно к многослойным печатным платам.

Алгоритмы на основе лабиринтов, такие как алгоритм Ли, гарантируют нахождение кратчайшего пути, что может быть важно для критических сигналов. Однако их высокая вычислительная сложность делает их малоприменимыми для трассировки всей платы, особенно многослойной. Алгоритм A\* предлагает улучшение за счет использования эвристики, но его эффективность сильно зависит от качества выбранной эвристической функции.

Канальные алгоритмы эффективны в структурированных областях, но их применимость к общей задаче трассировки МПП ограничена.

Алгоритмы на основе графов предоставляют гибкий способ моделирования задачи трассировки и позволяют применять различные алгоритмы поиска и оптимизации. Использование треугольных сеток может быть полезно для неортогональной трассировки, а комбинация глобальной и детальной трассировки, например, с использованием MCTS и A\*, является перспективным подходом.

Алгоритмы с удалением и повторной трассировкой являются мощным инструментом для достижения высокого процента

завершения трассировки в сложных проектах. Их итеративный характер позволяет находить решения, которые могут быть недоступны для однопроходных алгоритмов. Однако время выполнения таких алгоритмов может быть значительным.

Алгоритмы, учитывающие форму проводников, особенно важны для высокоскоростных МПП, где необходимо контролировать импеданс и минимизировать перекрестные помехи. Gridless и топологическая трассировка предоставляют большую гибкость в проектировании трасс, позволяя оптимизировать электрические характеристики платы.

Алгоритмы трассировки играют важную роль в обеспечении целостности сигналов и управлении тепловыделением в многослойных печатных платах.

Для минимизации перекрестных помех алгоритмы могут учитывать расстояние между трассами, использовать слои заземления и применять дифференциальную сигнализацию. Увеличение расстояния между сигнальными трассами и использование слоев заземления помогают снизить емкостную и индуктивную связь, вызывающую перекрестные помехи. Дифференциальная сигнализация, при которой используются две трассы для передачи сигнала, менее чувствительна к синфазным помехам.

Для обеспечения целостности сигналов алгоритмы могут контролировать импеданс трасс, согласовывать длины проводников и оптимизировать конструкцию переходных отверстий. Поддержание постоянного импеданса по всей длине трассы предотвращает отражения сигналов. Согласование длин проводников в критических цепях (например, в дифференциальных парах) необходимо для предотвращения временных сдвигов между сигналами. Оптимизация конструкции виа, например, использование глухих и скрытых виа, позволяет минимизировать паразитную емкость и индуктивность.

В области управления тепловыделением алгоритмы трассировки могут учитывать размещение термовиа для отвода тепла от компонентов, генерирующих большое количество тепла. Термовиа представляют собой металлизированные сквозные отверстия, обеспечивающие низкое тепловое сопротивление между слоями платы. Размещение слоев питания и земли вблизи сигнальных слоев способствует равномерному распределению тепла. Использование более широких проводников для цепей питания и земли также способствует улучшению теплоотвода.

В последние годы наблюдается активное развитие алгоритмов трассировки многослойных печатных плат, включая применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения.

В работе [1] упоминается использование глубокого обучения с подкреплением для автоматизации разводки выводов на многослойных печатных платах, что позволяет достичь высокого процента успешной трассировки и улучшить длину проводников. Также предлагается метод TRouter, использующий машинное обучение для учета тепловых характеристик при трассировке.

Разрабатываются новые алгоритмы для решения специфических задач, таких как трассировка выводов (escaperouting) для корпусов с высокой плотностью выводов [3]. Предлагаются алгоритмы на основе SAT (Booleansatisfiability) для многослойной трассировки выводов. Исследования направлены на улучшение существующих методов, таких как алгоритмы на основе теории потоков в сетях для одновременной трассировки нескольких цепей.

Наблюдается тенденция к разработке алгоритмов, учитывающих специфические требования, такие как трассировка дифференциальных пар с соблюдением ограничений по длине и задержке. Предлагаются автоматизированные инструменты для планирования шин на сложных печатных платах [1].

Современные системы автоматизированного проектирования печатных плат (САПР) включают в себя широкий спектр алгоритмов трассировки, позволяющих пользователям выбирать наиболее подходящий подход для конкретной задачи.

Многие САПР, такие как AltiumDesigner, PADS Professional, и Xpedition Enterprise, предлагают как интерактивные инструменты трассировки, позволяющие инженерам вручную прокладывать соединения, так и автоматические трассировщики (авторутеры), которые выполняют трассировку всех или выбранных цепей без участия пользователя.

Авторутеры часто используют комбинацию различных алгоритмов, таких как лабиринтные алгоритмы (например, Lee и A\*), алгоритмы на основе графов и алгоритмы с удалением и повторной трассировкой. Пользователи могут настраивать параметры автотрассировки, такие как предпочтительное направление трассировки, правила проектирования и стратегии оптимизации (например, минимизация количества виа или длины проводников).

Некоторые САПР предлагают специализированные алгоритмы, такие как TороR, реализующий топологическую трассировку под

любим углом, что может быть важно для высокоскоростных проектов и минимизации количества слоев и переходных отверстий.

Современные САПР также включают инструменты для анализа целостности сигналов и теплового анализа, которые могут быть интегрированы с процессом трассировки, позволяя инженерам учитывать эти аспекты на ранних этапах проектирования.

Подводя итог данной работы, можно сказать, что анализ современных алгоритмов трассировки многослойных печатных плат показывает, что не существует универсального решения, идеально подходящего для всех сценариев проектирования. Выбор наиболее эффективного и перспективного алгоритма зависит от множества факторов, включая сложность платы, плотность компонентов, требования к производительности (скорость передачи данных, частота сигналов), ограничения по стоимости и времени разработки.

Для простых и малослойных плат могут быть достаточны базовые лабиринтные алгоритмы или простые стратегии автотрассировки, предлагаемые САПР. Однако для сложных многослойных плат с высокой плотностью компонентов и строгими требованиями к целостности сигналов и тепловому режиму требуются более совершенные алгоритмы, такие как алгоритмы на основе графов, алгоритмы с удалением и повторной трассировкой, а также gridless алгоритмы, учитывающие форму проводников.

Интеграция методов искусственного интеллекта и машинного обучения открывает новые перспективы для автоматизации и оптимизации процесса трассировки, позволяя решать задачи, которые ранее требовали значительного ручного вмешательства.

В заключение следует отметить, что выбор оптимального алгоритма трассировки для многослойной печатной платы является сложной инженерной задачей, требующей глубокого понимания принципов работы различных алгоритмов, их сильных и слабых сторон, а также специфических требований конкретного проекта. Постоянное развитие технологий и появление новых алгоритмов делают эту область исследований весьма актуальной и значимой для современной электроники.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Ran Zhang Изучение алгоритмов маршрутизации для проектирования печатных плат. [Электронный ресурс]. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/144446551.pdf> (дата обращения: 30.03.2025).

2. Jiarui Chen, Yujing Zhou A Novel Global Routing Algorithm for Printed Circuit Boards Based on Triangular Grid. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/24/4942> (дата обращения: 30.03.2025).

3. Martin D.F. Последние научные разработки в области компоновки печатных плат . [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/221627107\\_Recent\\_research\\_development\\_in\\_PCB\\_layout](https://www.researchgate.net/publication/221627107_Recent_research_development_in_PCB_layout) (дата обращения: 30.03.2025).

4. Peter Gulyas Evaluating the Effectiveness of Autorouting in PCB Design – MDPI. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2673-4591/79/1/60> (дата обращения: 30.03.2025).

5. Jason Cong, Patrick H. Madden Performance Driven Multi-Layer General Area Routing for PCB/MCM Designs. [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.cecs.uci.edu/~papers/compendium94-03/papers/1998/dac98/pdffiles/23\\_1.pdf](https://www.cecs.uci.edu/~papers/compendium94-03/papers/1998/dac98/pdffiles/23_1.pdf) (дата обращения: 30.03.2025).

УДК 621.049.77

**ПРОКОФЬЕВ А.В.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

*В этой статье рассматриваются современные подходы к проектированию электронных средств. В ней также рассматриваются тенденции будущего, включая квантовые вычисления и нейроморфное проектирование, направленные на повышение эффективности и миниатюризацию электронных устройств.*

Эволюция проектирования электронных средств прошла долгий путь от ранних этапов, когда основное внимание уделялось дискретным компонентам и ручным процессам проектирования [1]. По мере усложнения интегральных схем и систем возникла необходимость в разработке автоматизированных инструментов и новых методологий. Исторически наблюдался переход от восходящего подхода, основанного на составлении принципиальных схем, к нисходящему подходу, использующему языки описания аппаратуры (HDL). В настоящее время наблюдается тенденция к использованию еще более высоких уровней абстракции, таких как проектирование на уровне электронной системы (ESL) [2]. Этот эволюционный процесс демонстрирует постоянное стремление к управлению растущей

сложностью за счет автоматизации и использования более абстрактных представлений.

Современные подходы к проектированию электронных средств обусловлены растущими требованиями к более высокой производительности, снижению энергопотребления, уменьшению размеров и расширению функциональности электронных устройств [3]. Эффективные методологии проектирования также важны для сокращения времени выхода на рынок и снижения затрат на разработку.

В современном проектировании электронных средств наблюдается сдвиг в сторону более высоких уровней абстракции и системного мышления. Происходит отход от традиционного проектирования на основе принципиальных схем к использованию языков описания аппаратуры (HDL) и проектированию на уровне электронной системы (ESL). На ранних этапах процесса проектирования все большее внимание уделяется системному моделированию и симуляции [2]. Этот переход указывает на изменение парадигмы: вместо фокусировки на отдельных компонентах основное внимание уделяется пониманию и оптимизации поведения всей системы с самого начала. Такой подход позволяет выявлять потенциальные проблемы на более ранних стадиях и улучшать общую производительность системы.

Одним из ключевых современных подходов является проектирование на основе моделей (Model-Based Design, MBD). MBD определяется как методология, ориентированная на создание и использование подробных моделей системы для проектирования, симуляции, генерации кода и тестирования. MBD обладает рядом значительных преимуществ, включая сокращение времени и стоимости разработки, ускорение выхода на рынок, повышение качества и надежности продукции, повышение функциональной безопасности, а также снижение потребности в физических прототипах и аппаратных итерациях. MBD предлагает значительное преимущество, позволяя осуществлять виртуальное прототипирование и тестирование, что может существенно снизить риски и затраты, связанные с физическими прототипами, особенно для сложных систем.

Методология MBD находит применение в различных областях, включая разработку силовых электронных систем, автомобильной электроники, такой как системы помощи водителю (ADAS), аэрокосмических систем, включая управление полетом, двигательные установки и системы электропитания спутников, а также киберфизических систем. Разнообразие областей применения

подчеркивает универсальность и широкую применимость MBD в различных инженерных дисциплинах, связанных со сложными электронными системами.

Современные средства автоматизации проектирования электроники (Electronic Design Automation, EDA) претерпели значительную эволюцию от набора отдельных инструментов для решения конкретных задач до интегрированных сред проектирования [1]. EDA инструменты можно классифицировать по их функциональности:

- Системы схемотехнического проектирования (Schematic Capture): Инструменты для создания принципиальных электрических схем.

- Системы проектирования печатных плат (PCB Layout): Программное обеспечение для разработки физической компоновки печатных плат, включая размещение компонентов и трассировку проводников.

- Системы моделирования схем (Circuit Simulation): Инструменты для моделирования и симуляции поведения электронных схем.

- Системы анализа целостности сигналов и питания (Signal Integrity and Power Integrity Analysis): Программное обеспечение для анализа качества сигналов и распределения питания в высокоскоростных проектах.

- Системы теплового анализа (Thermal Analysis): Инструменты для симуляции и анализа рассеивания тепла в электронных устройствах.

- Системы верификации и валидации (Verification and Validation): Программное обеспечение для функциональной верификации, временного анализа и других задач верификации и валидации.

- Современные EDA инструменты представляют собой не просто отдельные приложения, а интегрированные комплексы, поддерживающие весь процесс проектирования, обеспечивая беспрепятственный обмен данными и взаимодействие между различными этапами проектирования.

Современный подход к проектированию систем на кристалле (SoC) характеризуется растущей интеграцией разнообразных компонентов (процессоров, памяти, интерфейсов, графических процессоров и т. д.) на одном кристалле [2]. Ключевую роль в проектировании SoC играют блоки интеллектуальной собственности (IP), которые представляют собой предварительно разработанные и



протестированные функциональные модули. Одной из основных проблем является управление растущим числом взаимосвязанных IP-блоков и обеспечение бесперебойной связи между ними. Для решения этой проблемы используются передовые методологии межсоединений, такие как архитектуры Network-on-Chip (NoC), которые обеспечивают масштабируемые и эффективные способы управления связью, минимизации задержек и оптимизации энергопотребления.

Системы в корпусе (System-in-Package, SiP) приобретают все большее значение для гетерогенной интеграции и миниатюризации. SiP представляет собой передовую технологию корпусирования полупроводников, которая объединяет несколько разнородных полупроводниковых компонентов в одном модуле [4]. Преимущества SiP включают миниатюризацию и высокую плотность интеграции, повышенную производительность за счет коротких соединений, более высокую энергоэффективность, гибкость в использовании чипов, изготовленных по различным технологическим процессам и от разных производителей, упрощение проектирования печатных плат и ускорение выхода на рынок за счет использования предварительно разработанных компонентов.

Однако проектирование и производство SiP сопряжены с рядом проблем, таких как более высокая сложность проектирования, трудности с управлением температурным режимом и рассеиванием тепла, проблемы с целостностью сигналов и электромагнитными помехами, сложность координации цепочки поставок и трудности с тестированием и верификацией.

Выбор между SoC и SiP в значительной степени зависит от конкретных требований приложения, включая потребности в производительности, ограничения по размеру, целевые затраты и сроки выхода на рынок. SiP предлагает привлекательную альтернативу для приложений, требующих гетерогенной интеграции и миниатюризации, в то время как SoC остается доминирующим выбором для высокопроизводительной монолитной интеграции.

Таблица 1 – Сравнительный анализ SoC и SiP

Характеристика	System-on-Chip (SoC)	System-in-Package (SiP)
Интеграция	Все компоненты интегрированы на одном полупроводниковом кристалле	Несколько кристаллов и пассивных компонентов интегрированы в один корпус

Характеристика	System-on-Chip (SoC)	System-in-Package (SiP)
Производительность	Обычно выше за счет более коротких межсоединений на кристалле	Может быть оптимизирована для определенных межкристалльных соединений
Гибкость/ Кастомизация	Ограничена после изготовления кристалла	Выше за счет возможности комбинирования компонентов от разных производителей
Время выхода на рынок	Может быть дольше из-за сложности проектирования и производства одного кристалла.	Потенциально быстрее за счет использования существующих компонентов.
Стоимость	Высокие первоначальные затраты на проектирование и производство.	Зависит от количества и сложности интегрируемых компонентов.
Энергопотребление	Обычно ниже за счет коротких межсоединений на кристалле.	Может быть оптимизировано за счет эффективного распределения питания внутри корпуса.
Теплоотвод	Относительно проще, так как тепло выделяется с одного кристалла.	Может быть сложнее из-за нескольких источников тепла в небольшом объеме.
Приложения	Смартфоны, высокопроизводительные вычисления.	Носимые устройства, интернет вещей, медицинские устройства.

В области проектирования электронных средств наблюдаются многообещающие будущие тенденции. Интеграция искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML) открывает новые возможности для оптимизации производительности, энергопотребления, площади кристалла и стоимости в проектировании SoC[2]. AI используется для оптимизации исследования архитектурного пространства, размещения и трассировки компонентов, оптимизации кода, автозавершения кода и автоматической генерации кода. ML/AI применяются для точного

моделирования энергопотребления и проверки уровня оптимизации проектов чипов.

Квантовые вычисления, хотя и находятся на ранней стадии развития, обладают огромным потенциалом для преобразования проектирования электронных средств. Квантовые алгоритмы могут быть использованы для расширенного моделирования, оптимизации и безопасных протоколов связи. Они могут ускорить обработку сигналов, распознавание образов, поиск в базах данных и криптографию. Квантовые вычисления могут оптимизировать схемы, минимизировать энергопотребление и повысить энергоэффективность. Квантовое моделирование может привести к открытию новых материалов с оптимальными электронными свойствами. Несмотря на существующие проблемы с коррекцией ошибок, когерентностью кубитов и масштабируемостью, разработка квантовых чипов и стремление к поддержанию квантовой когерентности продолжаются. В будущем возможно появление гибридных классическо-квантовых вычислительных систем.

*Нейроморфное проектирование* представляет собой подход к вычислениям, вдохновленный структурой и функциями человеческого мозга [2]. Он направлен на воспроизведение аналоговой природы биологических вычислений и роли нейронов в когнитивных процессах. Нейроморфное оборудование (аналоговые, цифровые, смешанные аналого-цифровые СБИС) реализует модели нейронных систем для восприятия, управления движением и мультисенсорной интеграции. Нейроморфные системы отличаются энергоэффективностью благодаря обработке на основе событий и способностью к обучению и адаптации в реальном времени (пластичность). Подход предлагает потенциал для создания высокоэнергоэффективных и адаптивных систем, способных решать задачи распознавания образов и обработки сенсорной информации, имитируя архитектуру и функциональность мозга.

Современные подходы к проектированию электронных средств характеризуются стремлением к управлению растущей сложностью, повышению производительности, снижению энергопотребления и уменьшению размеров устройств. Ключевые методологии включают проектирование на основе моделей, которое позволяет осуществлять виртуальное прототипирование и тестирование, что приводит к сокращению времени и стоимости разработки. Средства автоматизации проектирования электроники (EDA) продолжают развиваться, предлагая все более интегрированные и мощные инструменты для поддержки всего процесса проектирования, от

схемотехнического проектирования до физической реализации и анализа.

Будущее проектирования электронных средств обещает быть захватывающим благодаря интеграции искусственного интеллекта и машинного обучения, потенциалу квантовых вычислений и развитию нейроморфных технологий. Эти перспективные направления могут привести к созданию более интеллектуальных, энергоэффективных и производительных электронных устройств, открывая новые возможности для инноваций в различных областях.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Петров Ю.В. Системы автоматизированного проектирования электронных устройств и САПР систем (E-CAD/EDA-системы): учебное пособие / Под ред. Ю.В. Петрова; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2015. – 64 с.
2. Marcian Cirstea, Khaled Benkrid Digital Electronic System-on-Chip Design: Methodologies, Tools, Evolution, and Trends. [Электронный ресурс]. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10892641/> (дата обращения: 25.03.2025).
3. John Min Managing Performance in Modern SoC Designs. [Электронный ресурс]. – URL: <https://semiengineering.com/managing-performance-in-modern-soc-designs/> (дата обращения: 25.03.2025).
4. The Ultimate Guide to Semiconductor Packaging. [Электронный ресурс]. – URL: <https://anysilicon.com/the-ultimate-guide-to-semiconductor-packaging/> (дата обращения: 30.03.2025).
5. Панков Л.Н. Учебное пособие по дисциплине «Основы проектирования электронных средств» / Л.Н. Панков, В.Р. Асланянц, Г.Ф. Долгов, В.В. Евграфов; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 260 с.

УДК 004.4

### **РАЗОРЕНОВ М.С., ЛОБАЧЕВ М.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ИНТЕГРАЦИЯ ПРИКЛАДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ: ПРОБЛЕМЫ, МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

*В статье рассматриваются ключевые проблемы и перспективы интеграции прикладных информационных систем (ПИС) на производственных предприятиях.*

*Проанализированы существующие подходы, выявлены основные барьеры, включая разнородность систем, высокую стоимость и риски безопасности. Предложены методы и алгоритмы для эффективной интеграции, охватывающие автоматизацию, маршрутизацию данных и обеспечение информационной безопасности. Подчёркивается значимость интеграции ПИС в условиях цифровизации и концепции Industry 4.0. Приведён обзор современных технологий и архитектурных решений, а также дана оценка результатам практического моделирования интеграционных процессов.*

Информационные системы (ИС) являются неотъемлемой частью современной промышленности. Их роль в управлении производственными процессами, логистикой и ресурсами предприятия трудно переоценить. Однако отдельные ИС, такие как ERP, MES, SCADA и PLM, часто работают автономно, создавая так называемые «информационные острова», которые препятствуют эффективному управлению. С развитием цифровизации и концепции Industry 4.0 интеграция ПИС становится критически важной задачей, обеспечивающей оперативность, точность и безопасность управления производством. Кроме того, единое информационное пространство позволяет формировать сквозную аналитику, минимизировать потери информации на стыках между подразделениями и обеспечивать прозрачность принятия решений. Для современных предприятий становится очевидным, что только тесная связка информационных и производственных систем может обеспечить гибкость и устойчивость в условиях высокой конкуренции и нестабильности рыночной среды.

Вопрос интеграции информационных систем в производственной среде остаётся одним из наиболее сложных и капиталоемких направлений цифровой трансформации предприятий. В условиях, когда на одном предприятии могут одновременно использоваться как современные решения, поддерживающие открытые стандарты и интерфейсы, так и устаревшие системы, ориентированные на локальную работу, встает задача обеспечения их согласованного взаимодействия. Проблемы усложняются тем, что каждое подразделение предприятия может иметь собственные требования к функциональности, безопасности и производительности используемой информационной среды. Также интеграция осложняется различиями в структуре данных, отсутствии унифицированных механизмов идентификации и авторизации пользователей, разницей в уровнях автоматизации процессов и архитектуре систем. Разработка решений, способных устранить эти барьеры, требует системного подхода, который сочетает в себе как технологические, так и организационные меры. Кроме технической сложности, возникает необходимость учитывать и человеческий фактор — обучение персонала, преодоление сопротивления изменениям, адаптация бизнес-процессов под новые

цифровые инструменты. Важно также обеспечить совместимость не только на уровне данных, но и на уровне бизнес-логики, что требует глубокой проработки схем взаимодействия между подсистемами.

Актуальные интеграционные технологии развиваются в направлении повышения степени автоматизации и интеллектуализации процессов обмена данными между системами. Middleware-решения, такие как Apache Camel, MuleSoft или Node-RED, позволяют создавать каналы интеграции между гетерогенными источниками данных, поддерживая трансформацию форматов и маршрутизацию потоков. Использование API-first подходов способствует построению сервисно-ориентированной архитектуры. Облачные вычисления предоставляют гибкость в масштабировании и резервировании, позволяя предприятиям сократить издержки на инфраструктуру. С точки зрения безопасности, современные решения предусматривают обязательное использование шифрования, многоуровневую систему прав доступа и мониторинг активности пользователей. Интеграция систем с использованием искусственного интеллекта и технологий машинного обучения позволяет автоматизировать не только технические, но и управленческие аспекты взаимодействия. Важную роль играет также применение цифровых двойников, позволяющих моделировать поведение производственных объектов в виртуальной среде и прогнозировать последствия внедрения новых ИС. Кроме того, всё большую популярность приобретают микросервисные архитектуры, в которых каждая функциональная единица системы разрабатывается, разворачивается и масштабируется независимо, что упрощает сопровождение и модернизацию решений.

Проектирование алгоритмов интеграции предполагает реализацию модульного и многоуровневого подхода. Алгоритмы преобразования данных обеспечивают приведение информации к согласованной структуре, устраняя дублирование и несоответствия. Применение средств автоматического анализа структуры потоков позволяет упростить процесс конфигурации интеграции. Важным элементом становятся методы маршрутизации и балансировки нагрузки. Не менее значимы алгоритмы обеспечения отказоустойчивости. Все компоненты алгоритмов тестируются в условиях имитации реальных производственных процессов. Кроме того, разрабатываются механизмы детектирования аномалий и автоматического восстановления соединений, что критически важно для обеспечения непрерывности процессов. Интеграция также требует внедрения механизмов логирования, аудита и визуализации текущих

потоков данных, что позволяет оперативно реагировать на сбои и оптимизировать работу системы. При построении алгоритмов большое значение приобретает выбор форматов обмена — JSON, XML, Protobuf — и протоколов передачи, таких как REST, gRPC, MQTT, OPC UA. Гибкость в этом вопросе обеспечивает возможность масштабирования системы в будущем и подключения новых компонентов без полной переработки архитектуры.

Проведённое моделирование производственной среды показало, что применение предложенных алгоритмов позволяет значительно снизить время обмена данными и повысить надёжность функционирования систем. Отмечено сокращение затрат на внедрение и обслуживание интеграционных решений, а также высокий уровень защищённости информационных потоков. Полученные результаты подтверждают жизнеспособность предложенных методов и их применимость для широкого круга производственных предприятий. В ходе тестирования была достигнута стабильная работа информационных потоков в режиме 24/7, обеспечена синхронизация данных между системами с задержкой менее одной секунды, а также реализована автоматическая регистрация ошибок и уведомление ответственных специалистов. Таким образом, опыт практического применения разработанных подходов показывает их высокую адаптивность, возможность настройки под конкретные условия и эффективность даже в средах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Результаты анализа и моделирования показывают, что качественная интеграция прикладных информационных систем является не только технической задачей, но и стратегическим инструментом управления. Рассмотренные алгоритмы и технологические подходы могут быть использованы как в рамках модернизации существующих ИС, так и при проектировании новых цифровых производственных комплексов. В долгосрочной перспективе грамотная интеграция систем создаёт фундамент для развития интеллектуального производства, внедрения IoT, IIoT и платформенных решений на основе ИИ и анализа больших данных. Кроме того, она обеспечивает основу для внедрения технологий предиктивного обслуживания, цифровой прослеживаемости продукции и формирования сквозной цепочки создания ценности. Таким образом, интеграция ПИС становится ключевым элементом построения современной киберфизической производственной среды, в которой информационные потоки так же важны, как и материальные. Продолжение работ в данном направлении включает исследование

возможностей применения мультиагентных систем, а также разработку стандартов обмена данными, соответствующих требованиям отечественного программного обеспечения и стандартов безопасности.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Типы интеграции информационных систем: классификация и особенности [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.decosystems.ru/typy-integratsii-informatsionnykh-sistem/> (дата обращения: 28.03.2025).
2. Интеграция информационных технологий в проектном производстве [Электронный ресурс] // Молодой ученый – 2012. – № 5 (39). – URL: <https://moluch.ru/archive/39/4500/> (дата обращения: 28.03.2025).
3. Романов А.Г. Информационно-аналитические системы управления предприятием. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 330 с.
4. Интеграция производственных и управленческих информационных систем [Электронный ресурс]. – URL: <https://sapr.ru/article/21092> (дата обращения: 28.03.2025).
5. Гринченко Н.Н. Проектирование информационных систем : учебное пособие / Н.Н. Гринченко, А.Ю. Громов, Н.И. Хизриева. – Москва: КУРС, 2023. – 176 с.
6. Интеграция информационных систем [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-informatsionnyh-sistem> (дата обращения: 28.03.2025).

УДК 621.372.54

**РЕПИН В.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **АНАЛИЗ МЕТОДИК СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ФИЛЬТРОВ**

*В статье рассмотрены анализ современных методов проектирования микроволновых фильтров, анализ существующих программных обеспечений для их расчета, а также моделирование микрополоскового полосно-пропускающего фильтра в AWRMicrowaveOffice с учетом результата расчета параметров в симуляторе электронных схем «QUCS».*



Современные телекоммуникационные системы требуют миниатюризации и повышения эффективности микроволновых компонентов, среди которых фильтры играют ключевую роль. Системное проектирование таких устройств сопряжено с необходимостью учета множества факторов, включая электродинамические характеристики, технологические ограничения и компромиссы между размерами и параметрами. В статье проводится анализ современных методик проектирования миниатюрных микроволновых фильтров, рассматриваются их преимущества, недостатки и перспективы развития. Особое внимание уделяется системному подходу, позволяющему оптимизировать конструкцию с учетом требований современных стандартов фильтрации сигналов.

#### *Проблематика проектирования микроволновых фильтров*

Микроволновый фильтр – это пассивное устройство, предназначенное для селекции сигналов в определенных частотных диапазонах в СВЧ-диапазоне (обычно от 300 МГц до 300 ГГц).

Микрополосковые фильтры являются компактными микроволновыми устройствами, изготавливаемыми по технологии печатных плат, где резонаторы и связи реализованы в виде металлических полосок на диэлектрической подложке [1]. Для их реализации широко используют конструкцию связанных МПЛ (СМПЛ). На рисунке 1 показано поперечное сечение двух связанных МПЛ, где две МПЛ шириной  $w$  расположены на расстоянии  $s$  друг от друга [2].

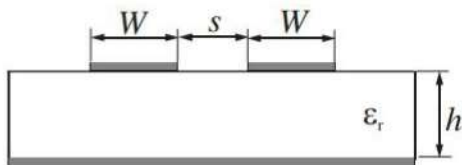


Рисунок 1 – СМПЛ

Среди плюсов микрополосковых фильтров можно выделить компактность, дешевизну массового производства, гибкость проектирования посредством создания разных топологий. Ключевыми минусами данных фильтров являются высокие потери на частотах выше 20 ГГц и чувствительность к паразитным связям.

Проектирование микроволновых фильтров связано с рядом сложных задач, обусловленных противоречивыми требованиями к их характеристикам, миниатюризацией компонентов и ужесточением стандартов беспроводной связи. Ключевые проблемы включают:

- Компромисс между размерами и параметрами– уменьшение габаритов фильтров часто приводит к ухудшению частотных характеристик, увеличению потерь и снижению добротности.

- Учет паразитных эффектов – влияние межэлементных связей, поверхностных волн и диэлектрических потерь требует сложного электродинамического моделирования.

- Технологические ограничения– методы изготовления (тонкопленочные технологии, керамические подложки, 3D-печать) накладывают ограничения на точность реализации проектируемых структур.

- Адаптация к современным стандартам– необходимость поддержки широкополосных и многодиапазонных режимов работы усложняет синтез топологии фильтров.

#### Методики проектирование микрополосковых фильтров

Рассмотрим существующие подходы к синтезу микрополосковых фильтров. Метод прототипов нижних частот является основным для создания микрополосковых структур. В ходе его применения сначала синтезируется нормированный ФНЧ (рисунок 2), который преобразуется в нужный тип с помощью частотных преобразований.

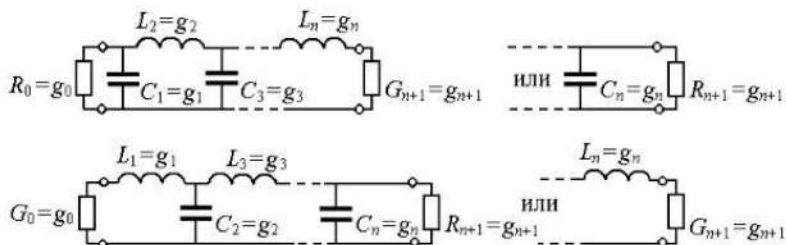


Рисунок 2 – Прототип фильтра нижних частот

Для нахождения обобщенных параметров  $g_0, g_1, \dots, g_{n+1}$  существуют таблицы значений на основе входных данных [3]. Эти параметры используются для расчета волновых сопротивлений СМПЛ по следующей формуле:

$$Z_{ci} = \left( c \sqrt{C_i^B C_i} \right)^{-1},$$

где индекс  $i$  заменяет  $e$  или  $o$  для четного и нечетного видов возбуждения соответственно;  $C_i$  - значение полной емкости четного

или нечетного типов распределения;  $C_i^6$  - значение полной емкости четного или нечетного типов распределения при условии, что диэлектриком является воздух;  $c$  – скорость света.

Данный метод позволяет рассчитать физические параметры фильтра на основе частотных требований. Хорошо применим для базового синтеза с последующей электродинамической оптимизацией.

Методы машинного обучения и генетические алгоритмы используются для предсказания параметров фильтра на основе обучающих данных. Они позволяют найти оптимальные параметры фильтра при нелинейных ограничениях и применяются для синтеза нестандартных топологий.

#### Программные средства для расчета топологии фильтра

Для дальнейшего перевода волновых сопротивлений в размерные величины применяется специализированное ПО. Среди них можно выделить встроенный в AWRMicrowaveOffice калькулятор микрополосковых линий «AWRTXLINЕ», а также симулятор электронных схем «QUCS» (рисунок 3). Их главным недостатком является невозможность расчета более чем двух связанных микрополосковых линий, что требует задействования дополнительных расчетов и снижает точность синтеза.

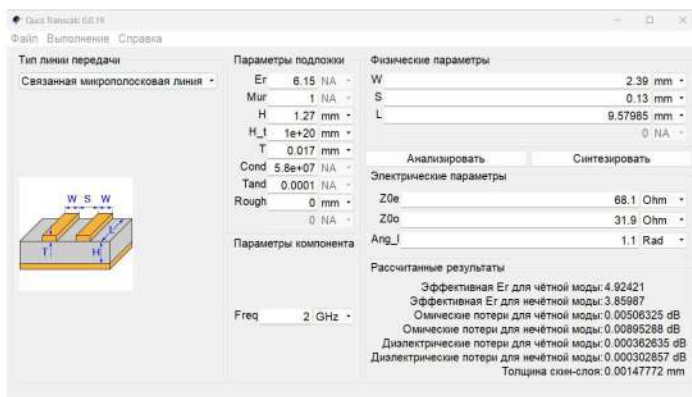


Рисунок 3 – Qucs

Проведем моделирование встречно-штыревого микрополоскового фильтра в среде проектирования AWRMicrowaveOffice [4] на основе расчетов физических параметров в «QUCS». На рисунке 4 представлена топология фильтра.

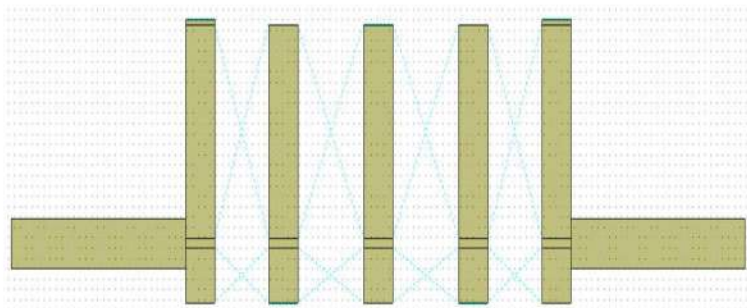


Рисунок 4 – Топология встречно-штыревого фильтра

На рисунке 5 показан график с результатами схемотехнического моделирования, где отражены амплитудно-частотные характеристики фильтра S11 и S21. Коэффициент отражения S11 в полосе пропускания оказался высоким, поэтому требуется оптимизация рассчитанных параметров.

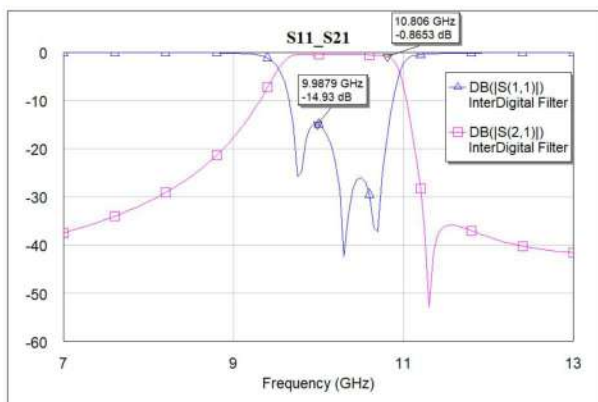


Рисунок 5 – АЧХ фильтра

Таким образом, можно сделать вывод, что существует потребность в создании программного интерфейса для расчета параметров микрополосковых устройств, поскольку современные решения имеют значительные недостатки и требуют дополнительной оптимизации полученных значений АЧХ.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Матгей Д.Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1 / Д.Л. Матгей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. – М.: Связь, 1971. – 440 с.

2. Hammerstad E.O. Equations for microstrip circuit design. In Proceedings of the European Microwave Conference, Hamburg, Germany, 1975. pp. 268 – 27.

3. Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич, В. П. Смирнов. - 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Сов. радио, 1967. – 651 с.

4. Васильев Е. П. Технология компьютерного моделирования в среде Microwave Office: методические указания к практическим и лабораторным занятиям / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2019. – 40с.

УДК 621.396

**РЫБИН В.П.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **КОНСТРУИРОВАНИЕ ОХРАННОГО GSM УСТРОЙСТВА С ОПОВЕЩЕНИЕМ ПО СЕТИ СОТОВОЙ СВЯЗИ/ИНТЕРНЕТУ**

*Рассматриваются вопросы проектирования и реализации охранного устройства, использующего GSM-связь и интернет для оповещения пользователя. Представлены этапы разработки, выбор компонентов и программная реализация системы.*

Современные системы безопасности всё чаще базируются на использовании мобильной связи и интернета, что позволяет осуществлять удалённый контроль за объектами.

Особое внимание уделяется охранным системам, которые не только реагируют на угрозы, но и способны оперативно передавать информацию владельцу объекта в случае срабатывания тревожного датчика. Это становится возможным благодаря внедрению микроконтроллерных устройств, поддерживающих работу с GSM-модулями и интернет-протоколами.

Разработка недорогого, но функционального охранного устройства, которое может использовать как сотовую связь, так и интернет-соединение для оповещения, представляет собой актуальную задачу. В настоящей статье рассматривается подход к построению такой системы, начиная от постановки задачи и выбора компонентов, до реализации и тестирования прототипа устройства.

Охранные системы, построенные на принципах удаленного оповещения, невозможно представить без использования современных технологий беспроводной связи. Одной из таких технологий является:

GSM - глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи с разделением каналов по времени (TDMA) и частоте (FDMA). Разработан под эгидой Европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций (ETSI) в конце 1980-х годов.

Принцип работы GSM-модуля основан на использовании AT-команд - стандартизированных текстовых инструкций, через которые микроконтроллер управляет модулем. С помощью AT-команд можно отправить SMS, инициировать HTTP-запрос, проверить состояние сети и даже получить координаты при наличии поддержки GPS. Пример базовой команды для отправки сообщения:

```
AT+CMGF=1
AT+CMGS="+79001234567"
> Тревога! Сработал датчик движения.
```

Одним из ограничений чистого GSM-подхода является отсутствие централизованного управления большим числом устройств, невозможность обновления прошивок по воздуху и ограниченная скорость передачи данных. Здесь на помощь приходит интернет вещей.

IoT концепция сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Предполагается, что организация таких сетей способна перестроить экономические и общественные процессы, исключить из части действий и операций необходимость участия человека. Для передачи данных в таких системах могут использоваться различные протоколы, среди которых:

MQTT - упрощённый сетевой протокол, работающий поверх TCP/IP, ориентированный на обмен сообщениями между устройствами по принципу «издатель – подписчик». HTTP(S) – привычный формат общения с веб-серверами, подходит для отправки тревожных сигналов и логов на облачные серверы.

CoAP, LoRaWAN, NB-IoT - более специализированные протоколы, применяющиеся в случаях особых требований к дальности и энергоэффективности.

Интеграция GSM и IoT делает систему охраны более гибкой и масштабируемой. К примеру, устройство может использовать GSM-сеть для отправки SMS при тревоге и одновременно подключаться к MQTT-брокеру для хранения логов. Это обеспечивает двойной

контроль и отказоустойчивость. Более того, в случае недоступности интернета, устройство может переключаться на fallback-режим с SMS-оповещением.

В промышленной практике также используется подход, при котором GSM-устройства работают в составе SCADA-систем — архитектурного комплекса для диспетчерского управления. В таких случаях каждая точка охраны представляет собой узел в распределенной сети.

В современных реализациях устройств безопасности особое значение приобретает способность быстро обрабатывать информацию от датчиков, принимать решения и передавать данные в минимальные сроки. Это требует высокой надёжности как программных, так и аппаратных компонентов. Поэтому выбор протокола передачи данных, а также надёжного канала связи — критически важен для общей архитектуры охранного устройства.

Таким образом, обзор современных технологий показывает, что наиболее эффективным является гибридный подход, сочетающий GSM-модули и протоколы IoT. Это позволяет добиться высокой скорости реагирования, надёжности связи и гибкости в дальнейшей модернизации.

Целью настоящей работы является разработка охранного устройства, способного оперативно оповещать владельца о нарушении охраняемой зоны с использованием как GSM-сети, так и интернет-соединения. Такое решение должно обеспечить надёжность связи, универсальность применения и минимальную стоимость компонентов.

Задачи, поставленные в рамках проекта: обеспечить модульную архитектуру устройства, включающую в себя датчики движения, GSM-модуль и интернет-модуль; разработать алгоритм срабатывания системы и передачи сигнала оповещения двумя независимыми каналами: SMS и интернет (например, через Telegram API); реализовать систему с возможностью автономного электропитания и пониженного энергопотребления в режиме ожидания; обеспечить простоту сборки, настройки и эксплуатации конечным пользователем.

Проектируемое устройство должно удовлетворять ряду требований: Надёжность: минимизация ложных срабатываний, устойчивость к помехам и сбоям; Доступность: использование недорогих и массово доступных компонентов; Гибкость: возможность масштабирования и модернизации, например, добавление видеонаблюдения или дополнительных датчиков; Информативность: чёткое и оперативное информирование пользователя через несколько каналов связи.

Таким образом, разрабатываемое решение представляет собой гибридную охранную систему, способную передавать информацию о потенциальной угрозе в реальном времени посредством мобильной сети и интернета, удовлетворяя требованиям безопасности, надёжности и экономичности.

Проектирование охранного устройства с возможностью GSM-оповещения и поддержкой интернет-связи требует детального подхода к разработке как аппаратной, так и логической схем. Устройство должно обеспечивать стабильность, отказоустойчивость и соответствовать требованиям энергоэффективности. Конструкция схемы должна учитывать множество факторов — от типа датчиков до режимов работы связи.

Центральный контроллер: В качестве основной управляющей единицы выбран ESP32, обладающий встроенным Wi-Fi-модулем и достаточным количеством портов ввода-вывода. В отличие от Arduino UNO, ESP32 позволяет обрабатывать несколько задач параллельно, а также имеет поддержку низкоэнергетических режимов.

GSM-модуль: для GSM-связи выбран модуль SIM800L, который способен отправлять SMS и совершать голосовые вызовы. Он легко интегрируется с ESP32 через UART и имеет множество готовых библиотек для Arduino IDE. SIM800L работает в сетях 2G, чего достаточно для задач оповещения.

Датчики: для обнаружения вторжения используются PIR-датчики движения, отличающиеся надёжностью и низким энергопотреблением. По необходимости может быть добавлен геркон для контроля открытия дверей/окон.

Электропитание: Питание устройства обеспечивается через аккумулятор Li-Ion 18650, стабилизированный модулем TP4056 и понижающим преобразователем AMS1117. Это позволяет устройству работать автономно длительное время, особенно при использовании режима сна ESP32.

Схема подключения: PIR-датчик подключается к цифровому входу ESP32; SIM800L подключается к UART порту через делитель напряжения.

Питание всех компонентов поступает от общего аккумулятора через стабилизаторы напряжения. Для интернет-связи используется Wi-Fi, а GSM — как резервный канал.

Такое сочетание компонентов обеспечивает баланс между стоимостью, функциональностью и стабильностью. При необходимости устройство может быть дополнено датчиками температуры, влажности, сиреной и другими элементами.



*Алгоритм работы системы и обработка тревожных событий*

Алгоритм работы охранного устройства направлен на надёжное обнаружение нарушений, передачу тревожных сигналов через GSM и/или интернет, и обеспечение энергоэффективности. При разработке учитывались устойчивость к ошибкам и возможность автономной работы.

1. Инициализация. При включении устройство: проверяет питание и заряд аккумулятора; настраивает GPIO и подключённые датчики; устанавливает соединение с GSM и, при наличии, с Wi-Fi; переходит в режим охраны, отображая статус через светодиод.

2. Основной цикл. Устройство опрашивает датчики (PIR, геркон). При срабатывании: проверяется достоверность события (двойное подтверждение); формируется тревожное сообщение (SMS, HTTP-запрос); активируется резервный канал связи при ошибке основного; включается световая/звуковая индикация тревоги.

3. Обработка ошибок. Предусмотрены: повторы отправки при сбоях; контроль AT-ответов от SIM800L; автоматический софт-ресет в случае зависаний; безопасный режим при перегреве/ошибках.

Для продления автономной работы: используется Deep Sleep у ESP32; GSM активируется только при тревоге; система пробуждается по прерываниям от датчиков.

SMS-команды для управления:

- ARM — активировать охрану;
- DISARM — отключить охрану;
- STATUS — текущий статус устройства;
- SETNUM:+7XXXXXXXXXX — смена номера получателя.

*Реализация программного обеспечения и тестирование прототипа*

Программная часть охранного GSM-устройства является ядром всей системы. Она отвечает за обработку сигналов с датчиков, контроль работы GSM-модуля, выполнение логики тревожного реагирования и оптимизацию энергопотребления. Программирование выполняется на языке C/C++ с использованием фреймворков, таких как Arduino IDE (для ESP32 и других микроконтроллеров) или ESP-IDF (при необходимости более глубокой настройки).

Прошивка делится на несколько логических блоков:

1. Инициализация. Настройка пинов, портов связи, проверка наличия модема, проверка подключения к Wi-Fi (если используется).

2. Главный цикл. Определение срабатывания датчика, реакция в зависимости от типа сигнала, формирование сообщения и передача его.

3. Подпрограммы и обработчики прерываний. Работа с входами (датчики), Обработка AT-команд и статусов от модема, управление питанием и таймерами.

Пример реализации на языке Arduino:

```
#include <HardwareSerial.h>
HardwareSerial sim800(1); // Используем второй UART
void setup() {
  pinMode(13, INPUT); // Датчик
  pinMode(2, OUTPUT); // Индикатор
  sim800.begin(9600, SERIAL_8N1, 16, 17);
  sendAT("AT");
  sendAT("AT+CMGF=1"); }
void loop() {
  if (digitalRead(13) == HIGH) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    sendSMS("+79001234567", "Тревога! Обнаружено
движение.");
    delay(10000);
    digitalWrite(2, LOW);
  }
  delay(500); }
void sendAT(String cmd) {
  sim800.println(cmd);
  delay(1000);
  while (sim800.available()) {
    Serial.println(sim800.readString());
  } }
void sendSMS(String number, String text) {
  sendAT("AT+CMGS=\"" + number + "\"");
  sim800.print(text);
  sim800.write(26); // Завершение CTRL+Z }
```

Для проверки работоспособности реализуется поэтапное тестирование:

- Функциональное: Проверка корректной обработки датчиков, корректность инициализации GSM-модуля.
- Тестирование связи: Передача SMS, проверка дозвола, отправка запроса по HTTP (при наличии).
- Индукционное тестирование: Воспроизведение ложных срабатываний, проверка устойчивости к сбоям сети.
- Тест на энергопотребление: Измерение потребления в активном режиме и во сне, проверка работы от аккумулятора.

*Применение и возможные направления улучшения*

GSM сигнализация – это современное решение для обеспечения безопасности человека и имущества. Она позволяет определить

проникновение посторонних лиц в офис, магазин, склад или коттедж и отправить тревогу на имя пользователя, который получает сообщение о срабатывании по SMS или через сайт компании.

Сферы применения:

- Частные объекты: дома, дачи, гаражи. Простота установки и универсальность делают их доступным решением.
- Сельское хозяйство: охрана амбаров и складов. Возможна интеграция с датчиками температуры и влажности.
- Промышленность: защита распределённых участков — цитовые, склады, лаборатории.
- Образование: контроль доступа в серверные и архивы.
- Транспорт и логистика: защита грузов и контроль вскрытия контейнеров.

Направления развития

- Интеграция с облачными сервисами: отправка данных в Firebase или MQTT.
- Видеонаблюдение: подключение камер и передача изображений.
- Удобные интерфейсы: Telegram-бот, мобильное приложение, web-панель.
- LoRa/NRF-сети: взаимодействие между несколькими устройствами.
- Автодиагностика: проверка связи и состояния системы.
- OTA-обновление: удалённая прошивка, особенно актуальна для ESP32.
- Защита данных: шифрование, фильтрация SMS.
- ИИ-алгоритмы: различение объектов и адаптивная фильтрация ложных срабатываний.

Таким образом, разработка охранного GSM-устройства с возможностью оповещения по сотовой сети и интернету является актуальным направлением применения информационных технологий в современной инженерной практике. В условиях постоянного роста требований к системам безопасности, особенно на удалённых объектах, предприятиях и в образовательных учреждениях, предложенное решение обеспечивает надёжную и экономичную альтернативу традиционным охранным системам.

Использование микроконтроллеров и модулей GSM/ESP позволяет достичь высокой автономности и гибкости в реализации различных сценариев оповещения. Благодаря возможности интеграции с мобильными сетями и облачными платформами устройство может оперативно передавать информацию о тревожных событиях без

участия человека, что особенно важно в промышленности, сельском хозяйстве и логистике.

Также важно отметить, что реализация подобных систем способствует распространению информационных технологий в новых прикладных областях — от охраны удалённых складов до защиты образовательных лабораторий и частных домов. Проектирование и программирование таких устройств вовлекает студентов и молодых инженеров в процесс цифровой трансформации окружающей среды, объединяя знания в области электроники, ИТ и телекоммуникаций.

Представленная работа может быть основой для дальнейших исследований и модернизаций, включая внедрение искусственного интеллекта, видеоаналитики, шифрования связи и взаимодействия с «умным домом». Всё это делает подобные устройства неотъемлемой частью будущей экосистемы автоматизированных охранных решений, отвечающих требованиям надёжности, доступности и интеллектуального управления.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Алиев Т.И. Основы проектирования систем: Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 120 с.
2. Гуревич С.М. Основы проектирования систем охраны на базе микроконтроллеров. – М.: РадиоСофт, 2020. – 264 с.
3. Смирнов И.А. Автономные охранные системы: проектирование и внедрение. – М.: Техносфера, 2022. – 135 с.

УДК 004.031.42

**СВЕТИКОВ Д.М.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

#### **МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ OBD-II**

*Рассматриваются функциональные возможности приложения, включая сбор, хранение и анализ данных, а также применение искусственного интеллекта для диагностики неисправностей.*

Современные автомобили оснащаются бортовыми системами самодиагностики (On-Board Diagnostics, OBD), которые с 1996 года стандартизованы по протоколу OBD-II. Через диагностический разъем

OBD-II электронный блок управления (ЭБУ) предоставляет доступ к данным о работе двигателя и других систем, а также к диагностическим кодам неисправностей (DTC). Наличие OBD-II открыло возможности для создания портативных сканеров и программных приложений, позволяющих автоладельцу самостоятельно контролировать техническое состояние автомобиля. В последние годы появились многочисленные мобильные приложения и устройства для считывания OBD-II данных (например, ELM327-адаптеры с Bluetooth) для мониторинга параметров автомобиля в реальном времени.

Однако многие из существующих решений ограничены отображением текущих параметров и чтением кодов ошибок, не обеспечивая долгосрочное хранение данных и интеллектуальный анализ для прогнозирования неисправностей. Актуальной задачей является разработка удобного инструмента, который не только визуализирует показатели автомобиля в режиме реального времени, но и накапливает историю данных и использует методы искусственного интеллекта для помощи в диагностике.

Цель данной работы – разработать мобильное приложение для мониторинга состояния автомобиля с использованием данных OBD-II, обладающее расширенным функционалом: сбор и хранение телеметрических данных, диагностика неисправностей на основе кодов ошибок и аномалий в показаниях, а также предоставление пользователю рекомендаций по обслуживанию. Для достижения этой цели в работе реализован клиент-серверный комплекс: мобильное приложение, собирающее данные по Bluetooth с диагностического разъема автомобиля, и серверная часть для обработки и хранения информации.

В статье описаны архитектура и основные компоненты созданной системы, рассматривается функциональность приложения и приводятся результаты экспериментальной проверки, а также намечены направления дальнейшего развития системы.

Разработанное мобильное приложение обеспечивает подключение к бортовой системе диагностики автомобиля через стандартный разъем OBD-II. Для беспроводного соединения используется адаптер ELM327, подключаемый к OBD-II разъему и передающий данные по Bluetooth на мобильное устройство. При запуске приложения выполняется сканирование доступных Bluetooth-устройств и установление соединения с адаптером; после сопряжения приложение переходит в режим реального времени получения данных (рисунок 1).

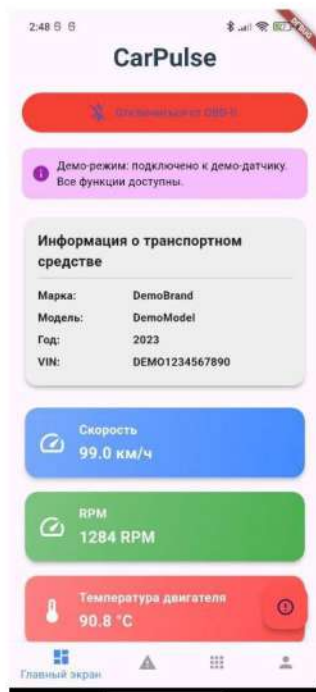


Рисунок 1 – Главный экран

Сбор данных осуществляется посредством стандартных PID-запросов OBD-II к ЭБУ автомобиля. Приложение считывает ключевые параметры работы двигателя и других систем: скорость автомобиля, обороты двигателя (RPM), температуру охлаждающей жидкости, положение дроссельной заслонки, давление во впускном коллекторе, напряжение бортовой сети и других параметров, доступных через OBD-II в типичных легковых автомобилях. Данные обновляются с высокой периодичностью и сразу отображаются пользователю (рисунок 2).



Рисунок 2 – Данные об автомобиле

Для визуализации данных в приложении реализованы удобные графические виджеты: цифровые индикаторы и шкалы (спидометр, тахометр и т.п.), а также графики изменения параметров во времени (рисунок 3). Пользователь может в режиме реального времени наблюдать за нагрузкой на двигатель, температурным режимом, расходом топлива и другими показателями. Кроме того, приложение ведет журнал данных: полученные телеметрические показатели сохраняются локально и на удаленном сервере для последующего анализа. Запись данных может производиться непрерывно во время поездки либо по запросу пользователя; при этом каждому набору данных присваивается временная метка и идентификатор поездки. Накопленные данные позволяют анализировать тенденции изменения параметров автомобиля со временем (например, рост температуры или снижение напряжения аккумулятора), а также формировать отчеты о работе автомобиля за выбранный период.



Рисунок 3 – Графики состояния автомобиля

Важной функцией приложения является работа с диагностическими кодами неисправностей (DTC). Приложение периодически опрашивает ЭБУ на наличие сохраненных кодов неисправностей. В случае обнаружения DTC, код выводится на экран с расшифровкой (названием ошибки) на русском языке для удобства пользователя. Реализована база данных наиболее распространенных кодов ошибок OBD-II с кратким описанием каждой проблемы (например, P0171 – обедненная смесь, P0300 – пропуски воспламенения и т.д.). Пользователь имеет возможность сбросить коды неисправностей, если это необходимо после устранения проблемы. Однако приложение предупреждает, что без решения причины ошибки сброс кодов приведет лишь к временному погашению индикатора неисправности (рисунок 4).



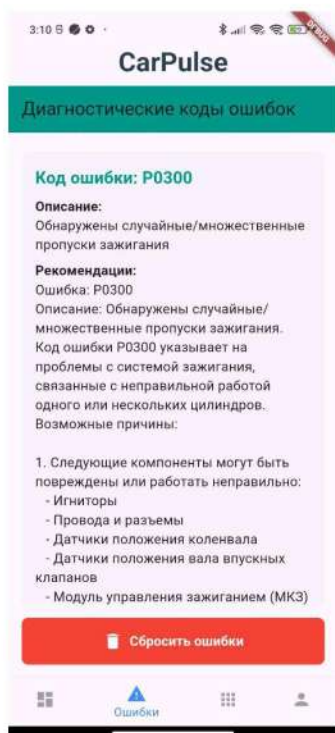


Рисунок 4 – Экран ошибок

Таким образом, разработанное приложение предоставляет пользователю комплексный набор функций: от постоянного мониторинга основных технических показателей автомобиля и отображения их в удобном виде до оповещения о выявленных проблемах и помощи в их диагностике.

Система имеет распределенную архитектуру «клиент-сервер», где мобильное приложение выступает в роли клиента, а серверная часть – в роли хранилища данных и аналитического модуля. Клиентская часть реализована как кроссплатформенное мобильное приложение с использованием фреймворка Flutter. Выбор Flutter обусловлен возможностью разработки единого приложения для Android и iOS, что расширяет охват устройств пользователей. Приложение написано на языке Dart и включает в себя модули для работы с Bluetooth, интерфейсом OBD-II и обмена данными с сервером. Для взаимодействия с адаптером ELM327 используется стандартный протокол последовательных команд: приложение

отправляет AT-команды и PID-запросы (например, 010C для считывания оборотов двигателя) через Bluetooth-канал и получает ответные сообщения с данными датчиков. В процессе разработки были использованы существующие библиотеки и API для работы с Bluetooth-адаптером, что ускорило реализацию протокола OBD-II.

Серверная часть приложения разработана на базе Java Spring Boot – современного фреймворка для создания масштабируемых веб-сервисов. Сервер развёрнут на удаленной машине и обеспечивает REST API для приема данных от мобильного клиента и предоставления ему необходимых сервисов. В качестве базы данных выбрана MongoDB – нереляционная документо-ориентированная СУБД, хорошо подходящая для хранения телеметрических данных автомобиля. Структура данных в MongoDB спроектирована с учётом специфики показателей: каждый документ содержит метаданные сессии и массив записей с параметрами и метками времени. Такой формат позволяет эффективно хранить временные ряды данных и выполнять по ним гибкие запросы (например, выборку параметров за определенный промежуток времени). Кроме того, MongoDB облегчает горизонтальное масштабирование хранилища при увеличении объема данных.

Между мобильным приложением и сервером реализовано защищенное взаимодействие по HTTP с передачей данных в формате JSON. При активном подключении к автомобилю приложение в фоновом режиме периодически отправляет пакеты данных на сервер, который принимает эти данные и помещает в базу, а при необходимости выполняет дополнительные расчёты. Также сервер предоставляет сервис уведомлений: если в поступающих данных обнаружены критические отклонения (например, перегрев двигателя), сервер может послать push-уведомление на устройство пользователя с предупреждением.

Мобильное приложение взаимодействует с ЭБУ автомобиля через Bluetooth-адаптер (ELM327), запрашивая данные по OBD-II. Одновременно приложение соединяется с сервером через Интернет (Wi-Fi или мобильная сеть) и передает собранные данные для хранения. Сервер обрабатывает данные, сохраняя их в MongoDB, и может присылать обратно на приложение аналитическую информацию или команды (например, запросить дополнительные данные). Такой подход обеспечивает масштабируемость и надежность: все данные сохраняются на сервере и не потеряются, даже если приложение на телефоне перезапущено или сменилось устройство. Кроме того, появляется возможность удаленного доступа: владелец автомобиля

может просматривать показатели через веб-интерфейс (при расширении системы) или делиться доступом к данным с сервисным центром для удаленной диагностики. Использование Spring Boot ускоряет интеграцию с внешними сервисами – например, подключение модуля отправки смс или интеграцию с облачными платформами аналитики.

Технологический стек системы включает также беспроводные коммуникации и протоколы, обеспечивающие надежность передачи. Применение Bluetooth для локального соединения с автомобилем оправдано его широкой распространённостью и простотой использования: скорость обмена данных через ELM327 Bluetooth адаптер достаточна для целей реального времени, а отсутствие проводов удобно для пользователя. Для связи клиента с сервером используется HTTP. В перспективе возможна реализация буферизации данных на стороне клиента при отсутствии интернет-соединения, с последующей отправкой при восстановлении связи.

Отдельного внимания заслуживает модуль интеграции искусственного интеллекта. В текущей реализации простой алгоритм диагностики выполняется на стороне клиента (встроен в приложение), но более сложные вычисления могут быть вынесены на сервер. Рассматривается архитектура, при которой сервер содержит обученную модель машинного обучения (например, нейронную сеть для обнаружения скрытых корреляций в телеметрических данных) и периодически обновляет эту модель по мере накопления новых данных от всех пользователей. Мобильное приложение в таком случае может запрашивать у сервера вывод модели (например, вероятностную оценку возникновения той или иной неисправности) при обнаружении подозрительных симптомов. Такой подход соответствует концепции IoT в автомобильной сфере, когда данные от множества подключенных автомобилей анализируются централизованно с целью улучшения моделей диагностики. Аналогичные идеи реализованы в некоторых работах по подключенным автотранспортным системам.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Документация по Bluetooth Low Energy (BLE) [Электронный ресурс] – URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/ble> (дата обращения: 18.03.2025).
2. OBD-II: Стандарты и диагностика [Электронный ресурс] – URL: <https://www.auterraweb.com/obd2.html> (дата обращения: 18.03.2025).

3. MongoDB Documentation: Работа с коллекциями и JSON [Электронный ресурс] – URL: <https://www.mongodb.com/docs/manual> (дата обращения: 18.03.2025).

4. Обработка данных и машинное обучение в диагностике автомобилей [Электронный ресурс] – URL: <https://towardsdatascience.com/predictive-maintenance-using-machine-learning-8341046ce0f8> (дата обращения: 18.03.2025).

5. Документация по библиотеке flutter\_bluetooth\_serial для работы с Bluetooth [Электронный ресурс] – URL: [https://pub.dev/packages/flutter\\_bluetooth\\_serial](https://pub.dev/packages/flutter_bluetooth_serial) (дата обращения: 18.03.2025).

6. Архитектура RESTful API для взаимодействия с OBD-II данными [Электронный ресурс] – URL: <https://restfulapi.net> (дата обращения: 18.03.2025).

7. Руководство по созданию диаграмм и графиков в Flutter с помощью fl\_chart [Электронный ресурс] – URL: [https://pub.dev/packages/fl\\_chart](https://pub.dev/packages/fl_chart) (дата обращения: 18.03.2025).

8. Технологии хранения больших объемов данных в MongoDB [Электронный ресурс] – URL: <https://www.mongodb.com/big-data> (дата обращения: 18.03.2025).

УДК 621.3.011.4

**СЕЛИФАНОВА Е.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ**

*В данной статье приведен анализ различных методов измерения емкости конденсаторов, их теоретическое обоснование, а также преимущества и недостатки.*

Конденсаторы являются одними из ключевых элементов электронных устройств, и точное измерение их емкости критически важно для проектирования и анализа электрических цепей. В данной статье рассматриваются некоторые методы измерения емкости конденсаторов: мостовые методы (метод сравнения с мерой, мост Шеринга, мост Вина) и метод заряда-разряда. Приводится теоретическое обоснование каждого метода, анализируются их преимущества и недостатки, а также области практического применения. Особое внимание уделяется математическому описанию

процессов и принципам работы измерительных схем, что позволяет оценить точность и ограничения каждого метода.

#### *Мостовые методы измерения емкости конденсаторов*

Название «мост» метод получил из-за того, что между двумя параллельными ветвями индикаторная диагональ образует как-будто мост. Измерение емкости конденсаторов выполняется мостом только переменного тока. Сопротивление четырехплечного моста в общем виде носит комплексный характер, поэтому условия равновесия моста переменного тока будут определяться двумя условиями: по модулю и по фазе. Мостовые схемы обладают высокой точностью, широким диапазоном измеряемых значений параметров элементов.

Существует несколько модификаций мостовых схем для измерения значений  $R$ ,  $L$ ,  $C$  электрорадиоэлементов. В зависимости от вида мостовых схем количество входящих в ее состав ветвей (плеч) мосты можно разделить на: четырехплечные, многоплечные, Т-образные и другие. Наиболее распространенными являются четырехплечные (одинарные) мосты. Т-образные мосты обычно применяют для измерения параметров электрических цепей на высоких и сверхвысоких частотах.

Для измерения емкости и тангенса угла потерь конденсаторов с достаточно малыми потерями применяют мостовые схемы с последовательным соединением  $C_x$  и  $R_x$ , а для конденсаторов с большими потерями - схемы с параллельным соединением  $C_x$  и  $R_x$ . Для измерения емкости используются три вида моста: мост для измерения методом сравнения с мерой, мост Шеринга и мост Вина.

#### *Мост для измерения методом сравнения*

Данный метод базируется на сравнении действия, оказываемого измеряемой ёмкостью  $C_x$  и известной ёмкостью  $C_0$  на режим измерительной схемы.

Простейшая схема измерений, в которой ёмкости  $C_x$  и  $C_0$  сравниваются по значению их сопротивления переменному току, такая схема приведена на рисунке 1. При включении конденсатора  $C_x$  с потенциометром  $R$  устанавливают в цепи ток, удобный для отсчёта или контроля по миллиамперметру переменного тока  $mA$  или другому низкоомному индикатору. Затем вместо конденсатора  $C_x$  присоединяют к схеме магазин ёмкостей или образцовый (опорный) конденсатор переменной ёмкости и изменением его ёмкости  $C_0$  добиваются прежнего показания индикатора. Это будет иметь место при  $C_0 = C_x$ . Погрешность измерений зависит от чувствительности индикатора и погрешности отсчёта ёмкости  $C_0$ ; она может быть получена равной примерно 1% и менее.

При измерении ёмкостей свыше, методом сравнения 5000 пФ схему измерений можно питать от сети переменного тока частотой 50 Гц. Для измерения меньших ёмкостей необходим генератор, работающий на более высоких частотах. Во всех случаях для обеспечения безопасности индикатора в цепь следует включать ограничительный конденсатор ( $C_1$ ) или резистор.

Метод сравнения в различных вариантах широко применяется в мостовых и резонансных измерителях ёмкостей. Он может быть реализован и в микрофарадметрах.

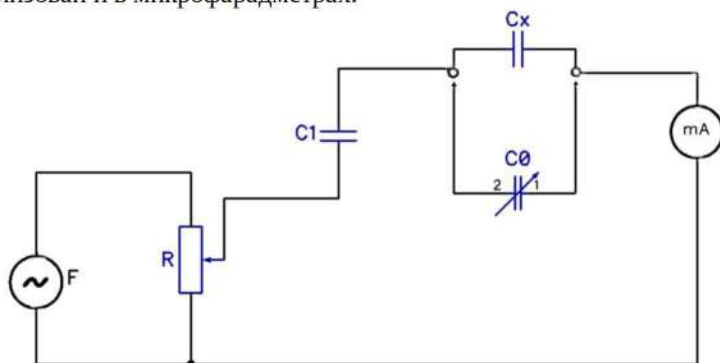


Рисунок 1 – Схема измерения ёмкостей

Метод сравнения с мерой не очень точен для измерения емкостей с малым  $tg\delta$ , в этих случаях лучше использовать мост Шеринга.

#### Мост Шеринга

Мост Шеринга – электрическая схема, предназначенная для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в конденсаторах, а также в электрических кабелях. Такая схема представляет собой одинарный мост, имеющий четыре плеча, в одно плечо которого включается магазин емкостей и параллельно присоединенное к нему постоянное активное сопротивление, в противоположное плечо включается испытуемый объект, эквивалентная электрическая схема которого состоит из последовательно соединённых емкостного и активного сопротивлений, в третье плечо включается магазин активных сопротивлений, в четвертое — эталонный конденсатор.

На одну диагональ подаётся переменное напряжение питания моста. К другой диагонали подключается ноль-индикатор переменного напряжения. Мост Шеринга (рисунок 2) – это по сути мост Витстона, в

котором активные сопротивления заменены комплексными, активно-емкостного характера. С точки зрения схемотехники одинарные мосты – это комбинация двух делителей напряжения и ноль-индикатора, включенного между ними.

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3,$$

где  $Z_1 - Z_4$  – комплексные сопротивления мостовой схемы.

Данное утверждение верно, если входное сопротивление ноль-индикатора очень велико, в идеале — равно бесконечности. При конечном входном сопротивлении ноль-индикатора последний будет вносить погрешность в измерительную схему, что необходимо учитывать. Приведение моста в состояние, при котором ноль-индикатор покажет нулевое значение называется балансировкой моста.

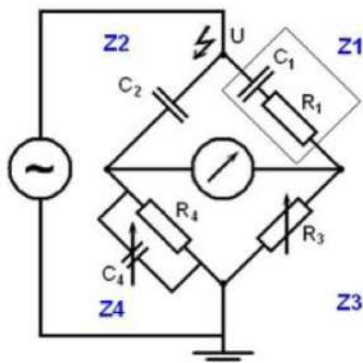


Рисунок 2 – Мостовая схема Шеринга

### Мост Вина

Схема состоит из четырех резисторов и двух конденсаторов, различных по величине сопротивления и емкости. Частотно-зависимой цепью является делитель напряжения, состоящий из конденсаторов и резисторов. Передаточная функция частотно-зависимого делителя напряжения выглядит следующим образом:

$$H_{dRC}(j\omega) = \frac{R_1 \parallel Z_{C_1}}{R_1 \parallel Z_{C_1} + Z_{C_2} + R_2} = \frac{R_1 \parallel \left( \frac{1}{j\omega C_1} \right)}{R_1 \parallel \left( \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \left( \frac{1}{j\omega C_2} \right) + R_2},$$

где  $Z_{C_1}, Z_{C_2}$  – реактивное сопротивление  $C_1, C_2$ ,  $j$  – мнимая единица;

Такой измерительный мост позволяет сравнивать эталонные катушки индуктивности с эталонными емкостями на не известной точно рабочей частоте. Эталонные емкости применяются в измерениях

высокой точности, поскольку они конструктивно проще прецизионных катушек индуктивности, более компактны, их легче экранировать, и они практически не создают внешних электромагнитных полей. Условия равновесия этого измерительного моста:

$$L_x = R_2 R_3 C_1,$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1},$$

Мост уравнивается даже в случае, когда источник сигнала содержит гармоники, если величина  $L_x$  не зависит от частоты.

Мост Вина может использоваться для измерений параметров конденсаторов. При этом в одно из плечей моста включают исследуемый конденсатор, варьируя входящие в мост сопротивления переменных резисторов и ёмкости переменных конденсаторов, а также частоту синусоидального напряжения питания моста, добиваются его балансировки, то есть равенства нулю напряжения диагонали моста. Мост Вина представлен на рисунке 3.

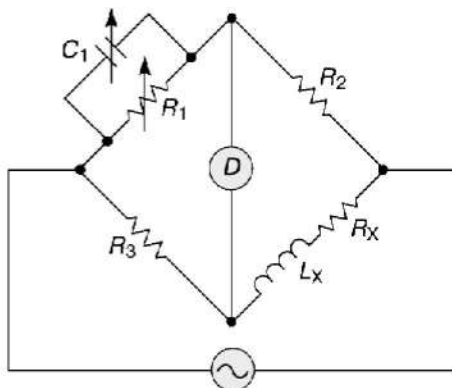


Рисунок 3 – Мостовая схема Вина

Преимущества мостовых методов:

- высокая точность измерений;
- широкий диапазон измеряемых значений;
- помехозащищенность;
- возможность универсального применения;
- возможность измерения малых емкостей;
- учет паразитных параметров (например, последовательного сопротивления конденсатора).

Недостатки:

- требуется ручная настройка баланса моста;



- зависимость от частоты переменного тока.

#### Метод заряда и разряда

Метод заряда и разряда конденсатора — это классический способ измерения его электрической емкости. Он основан на анализе временных характеристик процесса заряда или разряда конденсатора через известное сопротивление. Метод не требует сложного оборудования, прост и нагляден, а так же позволяет измерить емкость без специализированных приборов.

Рассмотрим процесс заряда конденсатора в электрической цепи, содержащей последовательно соединенные конденсатор  $C$ , сопротивление  $R$  и источник ЭДС ( $\varepsilon$ ) (рисунок 4).

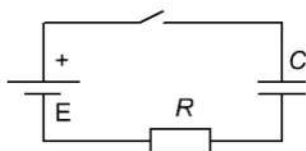


Рисунок 4 – Электрическая цепь при заряде конденсатора

Первоначально конденсатор не заряжен. Пусть  $I$ ,  $q$  и  $U$  – мгновенные значения тока, заряда и разности потенциалов между обкладками конденсатора. Полагая, что токи и напряжения удовлетворяют условиям квазистационарности (мгновенное значение тока во всех сечениях провода и элементах цепи одно и то же), можно допустить, что соотношение между мгновенными значениями  $I$ ,  $q$  и  $U$  такое же, как и в цепях постоянного тока.

В момент времени  $t=0$  ключ  $K$  замыкается и в цепи протекает ток, заряжающий конденсатор.

$$I = \frac{dq}{dt},$$

где  $q$  – заряд конденсатора.

По закону Ома, применимому к участку цепи, которая содержит ЭДС:

$$IR = \varepsilon - U,$$

где  $R$  – полное сопротивление цепи, включающее внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Учитывая, что разность потенциалов на пластинах конденсатора

$$U = \frac{q}{C}.$$

Запишем предыдущее уравнение в следующем виде:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon - q \cdot C}{R}.$$

Разделив переменные и проинтегрировав уравнение с учетом начального условия  $t=0, q=0$ , получим:

$$q = q_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right),$$

где  $q_m = \varepsilon C$  – предельное значение заряда на конденсаторе.

Напряжение на конденсаторе изменяется по закону:

$$U = \frac{q}{C} = \varepsilon \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right).$$

Закон изменения тока в цепи получим дифференцированием:

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

где  $I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$ .

Графики зависимостей  $q(t)$  и  $I(t)$  (рисунок 5):

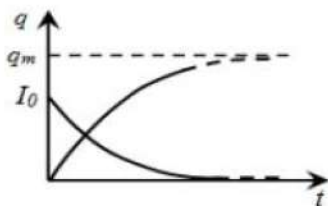


Рисунок 5 – Кривые изменения заряда на обкладках конденсатора и тока в цепи при заряде конденсатора

Рассмотрим процесс разряда конденсатора емкостью  $C$ , пластины которого замкнуты сопротивлением  $R$ . Пусть  $dq$  – уменьшение заряда конденсатора за время  $dt$ . При разряде конденсатора в цепи (рисунок 6) протекает ток  $I = -\frac{dq}{dt}$ .

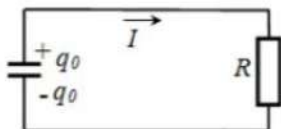


Рисунок 6 – Электрическая цепь при разряде конденсатора

Известно, что  $q = CU$ , где  $U$  – разность потенциалов на конденсаторе.

По закону Ома:

$$-\frac{dq}{dt} = \frac{U}{R} = \frac{q}{CR}$$

Уравнение показывает, что скорость уменьшения заряда конденсатора пропорциональна величине этого заряда. Интегрируя уравнение при условии, что в момент времени  $t = 0$ ,  $q = q_0$ , получим

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

Функция  $q(t)$  называется экспоненциальной. График зависимости  $q(t)$  (рисунок 7):

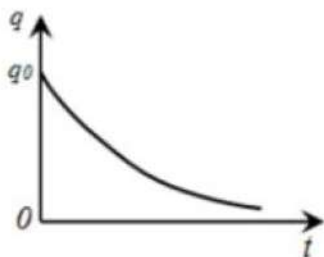


Рисунок 7 – Кривая изменения заряда на обкладках конденсатора при разряде конденсатора

Закон изменения напряжения на конденсаторе в процессе разряда аналогичен. Заряд и разряд конденсатора происходят по экспоненциальному закону. Напряжение на обкладках конденсатора асимптотически стремится к некоторому предельному значению (рисунок 8).

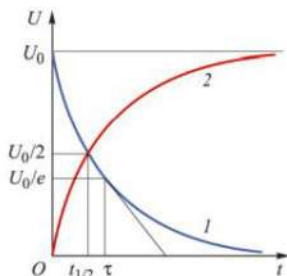


Рисунок 8 – Кривые изменения напряжения на обкладках конденсатора при его заряде (1) и разряде (2)

Как при заряде, так и при разряде конденсатора напряжение на его обкладках зависит от одних и тех же величин – емкости конденсатора  $C$ , сопротивления  $R$  в цепи и времени  $t$ , прошедшего от начала заряда или разряда. Произведение  $RC$  имеет размерность

времени  $\tau = RC$  и называется постоянной времени или временем релаксации  $\tau$ .

Сущность метода заключается в измерении тока разряда конденсатора, попеременно переключаемого с заряда на разряд с частотой, равной измеряемой.

Преимущества: простота реализации, низкая стоимость, универсальность, наглядность, возможность измерения больших ёмкостей, минимальные требования к точности оборудования, простота математической обработки; возможность оценки параметров конденсатора.

Недостатки: требуется время для проведения измерений (особенно для конденсаторов с большой ёмкостью); точность зависит от стабильности источника напряжения и точности измерения времени; не подходит для измерения очень малых ёмкостей (пикофарады), где более эффективны резонансные или мостовые методы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике / А.А. Данилин, Н.С. Лавренко. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 408 с.

2. Сухарев А.А. Электротехнические измерения: учебное пособие / А.А. Сухарев, В.В. Петровский, Д.В. Шахтурин. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2023. – 124 с.

УДК 621.3.011.4

**СЕЛИФАНОВА Е.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

*В данной статье рассматриваются современные устройства для измерения емкости конденсаторов. Рассмотрено несколько категорий измерительных приборов, проанализированы принципы работы, технические характеристики и особенности различных типов измерителей, а также рассмотрены их преимущества и недостатки.*

Точное измерение параметров электронных компонентов, в частности емкости конденсаторов, является важной задачей, как в процессе разработки, так и при диагностике электронной аппаратуры. Современная электроника предлагает широкий спектр устройств, для измерения емкости, различающихся по своим техническим

возможностям, точности и удобству использования. В данной статье рассматриваются две основные категории измерительных приборов: цифровые измерители RLC-параметров и специализированные емкостные измерители (микрофарадметры). Проанализированы принципы их работы, основные технические характеристики, достоинства и недостатки, а также области практического применения.

### Измерители RLC-параметров

RLC-метры – это универсальные измерительные приборы, предназначенные для определения основных электрических параметров пассивных компонентов: сопротивления (R), индуктивности (L) и емкости (C). Современные RLC-метры также позволяют определять различные параметры качества компонентов, такие как тангенс угла потерь, добротность, эквивалентное последовательное сопротивление и другие.

Принцип работы RLC-метров основан на измерении комплексного сопротивления (импеданса) компонента на заданной частоте тестового сигнала. Большинство цифровых RLC-метров используют метод измерения с автоматическим уравниванием моста, при котором параметры компонента определяются путем измерения напряжения и тока через исследуемый компонент. Схематическое представление принципа измерения показано на рисунке 1.

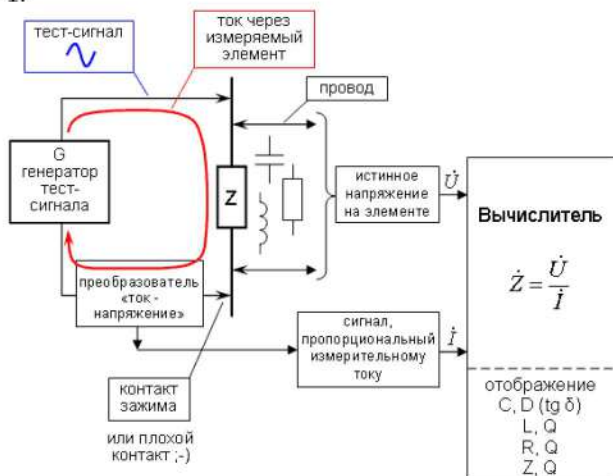


Рисунок 1 – Схема измерения импеданса в RLC-метре

Основные виды RLC-метров:

1. Портативные цифровые RLC-метры.

Компактные приборы, обычно с питанием от батарей, предназначенные для оперативных измерений в полевых условиях. Отличаются небольшими размерами, простотой использования и достаточной для большинства практических задач точностью. Диапазон измерения емкости обычно составляет от единиц пикофарад до сотен микрофарад, с типичной погрешностью 0,5-2%. Рабочие частоты тестового сигнала, как правило, фиксированные и составляют 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц.

### 2. Лабораторные прецизионные RLC-метры.

Стационарные настольные приборы, обеспечивающие высокую точность измерений в широком диапазоне значений и на различных частотах. Лабораторные RLC-метры часто имеют расширенные функциональные возможности, включая:

- Выбор частоты тестового сигнала в широком диапазоне (обычно от 20 Гц до 1-5 МГц);
- Возможность установки амплитуды тестового сигнала;
- Выбор различных эквивалентных схем замещения компонента (последовательная или параллельная);
- Функции статистической обработки результатов измерений;
- Возможность подключения к компьютеру для сбора и анализа данных [2].

Погрешность измерения емкости у таких приборов составляет от 0,05% до 0,5%, а диапазон измерения – от десятков фемтофарад до сотен миллифарад. Структурная схема лабораторного прецизионного RLC-метра представлена на рисунке 2.

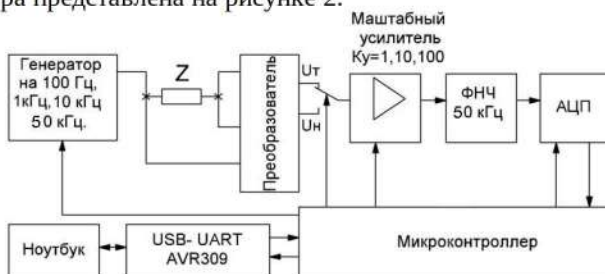


Рисунок 2 – Блок-схема лабораторного RLC-метра

### 3. Автоматические измерители иммитанса.

Специализированные приборы, измеряющие комплексное сопротивление (импеданс) и проводимость (адмиттанс) компонентов на различных частотах. Эти приборы позволяют проводить углубленный анализ характеристик конденсаторов, например, строить частотные зависимости емкости и тангенса угла потерь. Измерители

иммитанса особенно полезны при исследовании свойств диэлектриков и конденсаторов специального назначения.

Автоматические измерители иммитанса имеют следующие особенности:

- Широкий диапазон рабочих частот (от единиц герц до сотен мегагерц);
- Возможность развертки по частоте и построения частотных характеристик;
- Высокую точность измерений (погрешность от 0,01%);
- Расширенные возможности измерения параметров качества (ESR, добротность, тангенс угла потерь);
- Возможность применения различных измерительных приспособлений для различных типов компонентов. Типичный внешний вид автоматического измерителя иммитанса показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Автоматический измеритель иммитанса

*Специализированные ёмкостные измерители (микрофарадметры)*

Микрофарадметры – это приборы, специально разработанные для измерения емкости конденсаторов. В отличие от универсальных RLC-метров, они оптимизированы только для измерения емкости, что часто позволяет достичь большей точности и удобства в специфических применениях.

#### 1. Аналоговые микрофарадметры.

Исторически первыми широко применявшимися специализированными измерителями емкости были аналоговые микрофарадметры со стрелочной индикацией. Несмотря на развитие цифровой измерительной техники, аналоговые микрофарадметры до сих пор применяются в некоторых областях благодаря своей простоте, надежности и наглядности.

Принцип работы большинства аналоговых микрофарадметров основан на методе сравнения с мерой или на мостовых схемах измерения. Типичный аналоговый микрофарадметр содержит мостовую схему с образцовым конденсатором, генератор переменного

напряжения и индикатор равновесия (обычно стрелочный прибор). Схема типичного аналогового микрофарадметра представлена на рисунке 4.

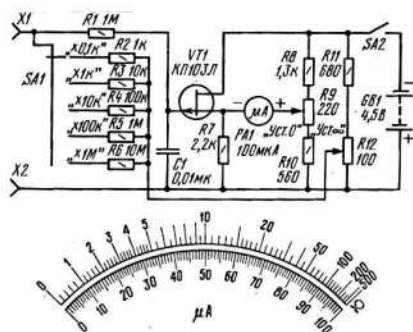


Рисунок 4 – Схема аналогового микрофарадметра

Преимущества аналоговых микрофарадметров:

- Простота конструкции и эксплуатации;
- Наглядность представления информации (особенно при сравнении параметров);
- Устойчивость к электромагнитным помехам;
- Надежность и долговечность.

Недостатки:

- Ограниченная точность (обычно не лучше 1-2%);
- Субъективность считывания показаний;
- Ограниченный диапазон измерений без переключения пределов;
- Необходимость периодической калибровки.

## 2. Цифровые измерители емкости.

Современные цифровые измерители емкости используют различные методы измерения, включая интегрирование тока заряда конденсатора, измерение постоянной времени RC-цепи или применение микропроцессорных аналогов мостовых схем. Структурная схема типичного цифрового измерителя емкости показана на рисунке 5.

Основные особенности цифровых измерителей емкости:

- Высокая точность измерений (погрешность от 0,1%);
- Автоматический выбор диапазона измерения;
- Цифровой дисплей, исключающий субъективность считывания;
- Дополнительные функции (память измерений, статистическая обработка);



- - Компактные размеры и эргономичный дизайн.



Рисунок 5 – Структурная схема цифрового измерителя емкости

Пример внешнего вида современного цифрового измерителя емкости представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Внешний вид цифрового измерителя емкости

### 3. Аналого-цифровые приборы с методом заряда-разряда.

Отдельную группу специализированных измерителей емкости составляют приборы, использующие метод заряда-разряда конденсатора через известное сопротивление. Принцип работы таких приборов основан на измерении времени заряда конденсатора до определенного уровня напряжения или на измерении тока разряда при периодическом переключении конденсатора с заряда на разряд.<sup>[1]</sup> Упрощенная схема измерителя емкости, основанного на методе заряда-разряда, показана на рисунке 7.

Основные преимущества приборов с методом заряда-разряда:

- Простота реализации измерительной схемы;

- Возможность измерения очень больших емкостей (до сотен фарад);
  - Низкая чувствительность к паразитным параметрам конденсатора;
  - Возможность измерения емкости электролитических конденсаторов с учетом их полярности.
- Недостатки:
- Относительно низкая скорость измерения, особенно для больших емкостей;
  - Зависимость точности от стабильности источника опорного напряжения;
  - Ограниченная точность при измерении малых емкостей.

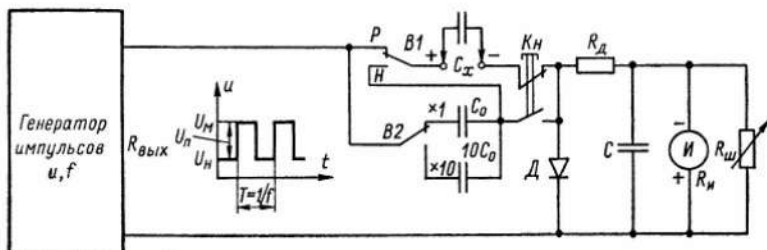


Рисунок 7 – Схема измерителя емкости методом заряда-разряда

Выбор конкретного типа прибора для измерения емкости должен основываться на следующих факторах:

- Требуемый диапазон и точность измерений;
- Необходимость измерения дополнительных параметров;
- Условия проведения измерений (лаборатория, производство, полевые условия);
- Тип исследуемых конденсаторов (керамические, пленочные, электролитические и т.д.);
- Требуемая скорость измерений;
- Стоимость оборудования и экономическая целесообразность.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афонский А.А. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов. – Москва: ДМК Пресс, 2021. – 688 с.
2. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике / А.А. Данилин, Н.С. Лавренко. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 408 с.

УДК 004.9

**СЕРЕБРЯКОВА С.С., КАСТЕРИНА Е.А.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ В  
ПРОТОТИПИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

*В статье рассматриваются современные технологии 3D-печати, применяемые в разработке электронных устройств. Приведены сравнительные характеристики методов, анализ материалов и перспективные направления развития.*

В последние годы 3D-печать стремительно завоевывает позиции одной из самых перспективных технологий в сфере разработки электронных устройств. Эта инновационная методика, которая всего несколько лет назад казалась экзотической, сегодня становится неотъемлемой частью производственного процесса в электронной индустрии.

Ключевое преимущество 3D-печати заключается в её беспрецедентной гибкости и скорости прототипирования. В отличие от традиционных методов, где создание прототипа может занимать недели и требовать значительных затрат на инструменты и оснастку, 3D-печать позволяет разработчикам получить физическую модель устройства в течение нескольких часов прямо в своей лаборатории. Это не только существенно сокращает время вывода продукта на рынок, но и значительно снижает затраты на разработку.

Особенно важно отметить возможности технологии в создании сложных геометрических форм и внутренних структур, которые практически невозможно реализовать традиционными методами. Инженеры получают уникальную возможность экспериментировать с дизайном, оптимизировать размещение компонентов и создавать интегрированные решения, объединяющие механические и электронные элементы в единое целое.

В этой статье мы подробно рассмотрим, как именно 3D-печать трансформирует процесс прототипирования электронных устройств, какие возможности она открывает для разработчиков и какие перспективы открывает перед индустрией электроники в целом.

**Основные технологии 3D-печати в электронике**

*Моделирование методом послойного наплавления.* FDM (Fused Deposition Modeling) - это наиболее распространенная технология 3D-печати, основанная на послойном наплавлении пластиковой нити (филамента). Принцип работы заключается в том, что расплавленный

материал послойно наносится движущейся головкой на поверхность рабочего стола, формируя трехмерную модель.

Технология FDM применяется как в простых настольных 3D-принтерах, так и в профессиональном оборудовании. Главное отличие между бытовыми и промышленными принтерами заключается в точности механики и используемых материалах. Если простые устройства работают преимущественно с PLA и ABS пластиками, то профессиональные машины могут использовать промышленные термопластики с улучшенными характеристиками.

Одно из ключевых преимуществ FDM - возможность создавать детали со сложной геометрией, которую трудно или невозможно получить традиционными методами производства (литьем, штамповкой или фрезерованием). При этом используемые термопластики обеспечивают прочность готовых изделий, сопоставимую с деталями, изготовленными традиционными способами.

Технология нашла применение практически во всех отраслях промышленности, науки и образования. Она позволяет быстро превращать виртуальные 3D-модели в физические объекты без необходимости сложной механической обработки или дорогостоящей оснастки [4].

Существуют определенные ограничения технологии:

- Минимальный размер детали составляет 0.5 мм.
- Скорость печати ниже, чем у некоторых других технологий.
- Поверхность готовых изделий имеет заметную шероховатость из-за послойного построения.
- Невозможно создавать металлические детали.

Несмотря на эти ограничения, FDM остается одной из самых популярных технологий 3D-печати благодаря оптимальному соотношению стоимости оборудования и расходных материалов, а также возможности создавать функциональные прототипы, способные выдерживать агрессивные среды, высокие температуры и механические нагрузки.

*Стереолитография.* SLA (Stereolithography Apparatus) - это технология 3D-печати, основанная на послойном отверждении фотополимерной смолы под воздействием ультрафиолетового лазера. Технология обеспечивает высокую точность и гладкость поверхности готовых изделий, что делает её идеальной для микроэлектроники и прецизионных деталей. С помощью SLA создаются миниатюрные корпуса микросхем, датчики, точные крепежные элементы, направляющие, оптические компоненты и линзы.

Одно из главных преимуществ метода - высокое разрешение до 25 микрон, что позволяет получать детализированные модели без необходимости дополнительной постобработки.

Однако существуют и определенные ограничения: высокая стоимость материалов, относительно ограниченная прочность готовых изделий по сравнению с термопластами, а также чувствительность к ультрафиолетовому излучению и температурным воздействиям.

*Цифровая обработка света.* DLP (Digital Light Processing) - аналогичная технология 3D-печати, использующая цифровую обработку света через DMD-чип для отверждения фотополимерной смолы. Как и SLA, DLP обеспечивает высокую точность и качество поверхности готовых изделий, что делает её подходящей для производства микрoeлектронных компонентов, оптических элементов и прецизионных деталей.

Технология позволяет достигать такого же высокого разрешения до 25 микрон и также работает с широким спектром фотополимерных материалов, включая специализированные составы с различными свойствами. Особенностью DLP является более равномерное отверждение материала благодаря использованию DMD-чипа, что может обеспечивать определенные преимущества в точности печати по сравнению с традиционным SLA.

К недостаткам DLP относятся те же характеристики, что и у SLA: высокая стоимость материалов, ограниченная прочность готовых изделий в сравнении с термопластами, а также чувствительность к ультрафиолетовому излучению и температурным воздействиям.

*Многоматериальная печать.* PolyJet представляет собой передовую технологию 3D-печати, разработанную компанией Stratasys, которая позволяет создавать высокоточные модели с использованием различных материалов в рамках одного производственного цикла. Принцип работы технологии напоминает обычный струйный принтер, но вместо чернил используется жидкий фотополимерный пластик, который наносится тонкими слоями (до 16 микрон) на специальную платформу. Каждый нанесенный слой мгновенно затвердевает под воздействием ультрафиолетовой лампы, что позволяет создавать сложные геометрические формы с высокой точностью.

Особенностью PolyJet является возможность одновременного использования нескольких материалов, что открывает широкие перспективы для создания прототипов с различными свойствами. Технология поддерживает более ста различных материалов, от мягких до твердых, от прозрачных до непрозрачных, что позволяет создавать

изделия с уникальными характеристиками. При печати используется специальный гелеобразный опорный материал, который обеспечивает возможность создания тонких перемычек и сложных конструкций.

Преимущество данной технологии заключается в превосходном качестве поверхности готовых изделий и отсутствии необходимости в дополнительной обработке. Модели готовы к использованию сразу после печати, что существенно сокращает время производства. Высокая точность печати с погрешностью до 0,1 мм позволяет создавать детализированные прототипы, максимально точно имитирующие свойства конечного продукта.

Технология находит широкое применение в различных областях: от быстрого прототипирования до производства конечных продуктов. Она особенно ценна в промышленности, где позволяет производителям тестировать и совершенствовать дизайн изделий до начала массового производства, что существенно снижает риски и затраты на разработку новых продуктов.

*Прямая печать электроники.* Печатная электроника — это перспективное направление микроэлектроники, основанное на методах печати, аналогичных полиграфическим. Принцип работы заключается в использовании специальных токопроводящих материалов вместо обычной краски, которые наносятся на различные подложки: ткань, бумагу, плёнку, стекло. Возможно создание многослойных структур.

Технология обладает рядом существенных преимуществ: более простое и дешёвое производство по сравнению с кремниевой технологией, возможность создания гибких элементов большой площади, простота интеграции с элементами дизайна и возможность использования одnorазовых или сменных компонентов.

Области применения печатной электроники разнообразны: сельское хозяйство (датчики погоды и влажности), медицина (диагностические стикеры для измерения температуры), ноутбуки и мобильные устройства (гибкие дисплеи), космонавтика (лёгкие электронные компоненты), энергетика (солнечные батареи), интернет вещей (сенсоры и RFID-метки) [2].

Российский рынок оценивается в 40 млрд рублей в ближайшие 3–5 лет, а мировой составляет около 15 млрд долларов с ожидаемым ростом до 44 млрд долларов к 2030 году. Технология позволяет создавать простые электронные компоненты без использования кремния, осветительные приборы, солнечные элементы, массивы сенсоров, носимые устройства и системы подогрева одежды.

Особенно перспективным направлением является создание гибких дисплеев для мобильных устройств и телевизоров, которые

будут лёгкими, тонкими и способными к деформации. Также большое будущее за солнечными панелями, которые можно будет интегрировать в различные поверхности, включая окна зданий. В России развитие этой технологии координируется Госнаком совместно с ключевыми разработчиками, что способствует формированию эффективных производственных цепочек и совместным исследованиям в данной области.

#### *Применение технологий 3D-печати в прототипировании электронных устройств*

Корпуса и крепления. 3D-печать революционизировала процесс создания корпусов и креплений для электронных устройств, предлагая беспрецедентную гибкость в проектировании. Одно из главных преимуществ — возможность оперативно вносить изменения: модифицировать САД-модель и печатать новую версию корпуса в течение нескольких часов. Технология позволяет создавать встроеные крепления, кабельные каналы и системы охлаждения в едином процессе печати. Кроме того, можно точно настроить посадочные места под габариты конкретных электронных модулей.

На практике эта технология успешно применяется для производства защитных кожухов промышленных контроллеров с классом защиты IP65, специализированных креплений для печатных плат нестандартной формы и корпусов IoT-устройств с интегрированными антенными решётками.

*Печатные платы (3D-печатные PCB).* Аддитивные технологии открыли новые возможности в производстве печатных плат. Теперь можно создавать гибкие схемы с проводящими дорожками на эластичных подложках (TPU, PI), формировать многослойные конструкции с одновременным нанесением проводящих и диэлектрических слоёв, а также изготавливать платы сложной формы, недоступной для традиционных методов производства [5].

Особенно перспективными направлениями становятся встраивание пассивных компонентов (резисторов и конденсаторов) непосредственно в структуру платы, производство высокочастотных плат с контролируемыми диэлектрическими свойствами, а также быстрое прототипирование RF-модулей и антенных систем.

*Антенны и сенсоры.* 3D-печать открывает широкие возможности для создания высокоэффективных антенных систем и чувствительных элементов. В области антенных технологий технология позволяет печатать градиентные структуры для точного управления диаграммой направленности, а также изготавливать компактные антенны миллиметрового диапазона, необходимые для работы в сетях 5G.

В сфере чувствительных элементов 3D-печать даёт возможность создавать температурные датчики со встроенными термопарами, газовые сенсоры с пористыми чувствительными слоями, а также интегрировать RFID-метки непосредственно в упаковку продукции.

*Прототипирование носимой электроники.* Для носимых устройств 3D-печать открывает широкие возможности создания инновационных решений. Технология позволяет печатать эластичные схемы на текстильных основах и силиконовых подложках, создавать биосовместимые конструкции с использованием медицинских сертифицированных материалов, а также разрабатывать гибридные системы, сочетающие в себе жёсткие и гибкие элементы в одном устройстве.

Практическое применение этих технологий уже находит отражение в реальных проектах. Среди успешных примеров можно отметить разработку умных повязок с встроенными датчиками жизненных показателей, создание спортивных гаджетов с интегрированной сенсорикой, а также прототипирование электронной кожи для робототехнических систем.

Таблица 1 – Сопоставление технологических параметров 3D-печати.

Применение	Оптимальные технологии	Типичные материалы	Точность
Корпуса	FDM, SLS	ABS, Nylon, Photopolymers	$\pm 0.1-0.3$ мм
Гибкие PCB	DIW, Aerosol Jet	Проводящие чернила, TPU	$\pm 0.05-0.1$ мм
Антенны	SLA, SLS	Диэлектрики, Ag-паста	$\pm 0.02-0.05$ мм
Носимая электроника	PolyJet, FDM	Эластомеры, биосмолы	$\pm 0.1-0.2$ мм

Перспективы развития можно сформулировать в следующих пунктах.

- Разработка новых композитных материалов с улучшенными электрофизическими свойствами.
- Интеграция 3D-печати с автоматизированным монтажом компонентов.
- Создание полностью напечатанных электронных систем (от корпуса до схемы).



▪ Развитие технологий печати органической и гибридной электроники 3D-печать продолжает расширять границы возможного в прототипировании электронных устройств, сокращая время от идеи до готового прототипа с недель до дней и позволяя реализовывать инновационные концепции, недоступные традиционными методами производства.

Далее рассмотрим материалы для 3D-печати в электронике.

*Проводящие материалы.* Проводящие филаменты - это специальные пластики (как PLA или ABS), в которые добавили вещества, обладающие электропроводностью.

Есть два основных вида таких материалов:

1. С графитом и углеродными нанотрубками - они проводят ток не очень сильно, но этого хватает для простых задач, например, чтобы сделать дорожки для электричества или датчики.

2. С медью или серебром - проводят ток лучше, но после печати их нужно дополнительно обрабатывать: прокалить в печи или обработать лазером.

Такие материалы используют, чтобы печатать электрические контакты прямо в вещах, делать гибкие датчики или создавать антенны для RFID-меток

Есть ещё другой способ - использовать специальные проводящие чернила на основе серебра, меди или графена. Их можно нанести очень точно (как ручку используешь), и после нанесения нужно только прогреть - получится хорошая электропроводящая дорожка. С их помощью можно делать сложные схемы прямо на трёхмерных предметах.

*Диэлектрики.* В 3D-печати для электроники используются различные типы материалов, каждый из которых имеет свои особенности и области применения. Среди стандартных термопластов PLA выделяется своей доступностью, однако имеет ограничения по прочности и температурной устойчивости (выше 60°C). ABS демонстрирует лучшую термостойкость (до 100°C) и ударопрочность, но требует подогрева платформы при печати. PETG сочетает преимущества PLA и ABS, устойчив к влаге и химическим веществам.

Фотополимеры (SLA/DLP) предлагают стандартные смолы с отличной детализацией (до 25 мкм) и гладкой поверхностью, но с ограниченной прочностью, а также инженерные смолы с повышенной термостойкостью (до 200°C), гибкостью или свойствами, аналогичными ABS/PP. Эти материалы особенно полезны для создания корпусов микросхем, оптических элементов и изоляторов высокочастотных плат.

Гибкие материалы представлены TPU с высокой эластичностью (до 500% удлинения), подходящим для герметизации и носимых устройств, а также силиконоподобными фотополимерами, имитирующими резиновые свойства и используемыми в уплотнениях и мягких контактах.

Каждый из этих материалов находит своё применение в зависимости от требований к конечному изделию, его функциональности и условий эксплуатации.

#### *Композитные материалы*

Термопроводящие композиты могут быть как с керамикой (теплопроводность до 3–10 Вт/(м·К), печать радиаторов для светодиодов), так и алмазной пылью (до 20 Вт/[м·К]), но высокая абразивность требует износостойких сопел.

Упрочнение волокон карбоновым волокном повышает жесткость в 2–3 раза, но увеличивает износ экструдера. Можно использовать стекловолокно – оно дешевле карбона, подходит для несущих конструкций.

3D-печать позволяет существенно сократить время разработки электронных устройств. Процесс создания прототипа от эскиза до готового корпуса занимает всего несколько часов, что значительно быстрее традиционного фрезерования, требующего нескольких недель. Такой подход также упрощает итеративное тестирование: разработчики могут быстро проверить форм-фактор, например, подогнать корпус под плату за 3-5 итераций в течение одного дня. Кроме того, появляется возможность печатать функциональные прототипы, такие как вентилируемые кожухи для тестирования теплоотвода.

Важным преимуществом является возможность кастомизации: теперь можно интегрировать в корпус индивидуальные крепления и кабельные каналы, а также создавать анатомически точные носимые устройства с идеальной посадкой. Это позволяет создавать персонализированные решения, полностью соответствующие требованиям конкретного проекта.

3D-печать позволяет создавать микрокомпоненты с высокой точностью, хотя и с некоторыми ограничениями. Технология FDM обеспечивает минимальный размер деталей в диапазоне 0.2-0.5 мм, что достаточно для большинства микрокомпонентов. SLA-печать демонстрирует еще более высокую точность до 0.05 мм, однако для создания микропазов размером 0.01 мм требуется использование литографии.

После печати компоненты могут подвергаться дополнительной обработке. Гальванизация применяется для улучшения электропроводности напечатанных контактов, что особенно важно для функциональных элементов. Полировка и покраска не только улучшают внешний вид изделий, но и обеспечивают защиту от влаги, что необходимо для их долговечности в эксплуатации.

Однако существуют определенные ограничения материалов. В частности, пока не существует подходящих аналогов спеченной керамики для создания СВЧ-устройств, а также подходящих заменителей алюминиевых теплопроводов, что может ограничивать применение 3D-печати в некоторых специализированных областях электроники.

Современные технологии 3D-печати в электронике позволяют развивать отрасль в новых направлениях. В области гибридных технологий уже сейчас применяются инновационные решения, такие как технология встраивания компонентов, позволяющая создавать корпуса с предварительно спроектированными полостями для микросхем, после чего выполняется традиционная пайка. Кроме того, роботизированные системы сборки от компании Nano Dimension способны одновременно выполнять печать и монтаж SMD-компонентов.

Органическая электроника представляет собой перспективное направление, включающее разработку OLED-дисплеев с использованием печати светоизлучающих слоев на гибких подложках и создание биосенсоров на основе проводящих гидрогелей для мониторинга различных параметров, таких как pH или уровень глюкозы.

Особое место занимает 4D-печать, открывающая возможности создания самосборных структур, например, антенн, способных разворачиваться при нагреве, а также работы с адаптивными материалами, способными изменять свою жесткость в зависимости от приложенной нагрузки [3].

Эти технологии открывают новые возможности для создания умных устройств с интегрированной электроникой, гибкой электроникой и адаптивными системами, что может найти применение в различных областях, от потребительской электроники до медицинского оборудования.

В заключение можно отметить, что технологии 3D-печати открывают новые возможности в прототипировании электронных устройств, обеспечивая беспрецедентную гибкость проектирования и сокращение времени вывода продуктов на рынок. Несмотря на

существующие технологические ограничения, постоянное совершенствование материалов, оборудования и программного обеспечения позволяет прогнозировать дальнейшее расширение сферы применения аддитивных технологий в электронной промышленности [1]. Перспективные направления развития включают создание полностью напечатанных электронных устройств, интеграцию различных функциональных материалов и разработку автоматизированных систем проектирования, оптимизированных для аддитивного производства.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гибсон И., Розен Д., Штукер Б. Аддитивные технологии производства: 3D-печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: Техносфера, 2021. – 520 с.
2. Сидоров Д.А. Перспективы развития 3D-печати в электронной индустрии // Современные технологии автоматизации. – 2024. – №1. – С. 44-50.
3. Кулагин В.П., Петров А.Н. Современные технологии аддитивного производства в электронике // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2023. – № 2. – С. 56–63.
4. Nano Dimension. DragonFly IV: Precision 3D Printing of Electronics. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.nano-di.com> (дата обращения 15.03.2025).
5. Официальный сайт Ассоциации аддитивных технологий. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.am-additive.org> (дата обращения 15.03.2025).

УДК 681.84

**СЛЕПЦОВА А.Ю.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА С ПОДДЕРЖКОЙ НЕСКОЛЬКИХ ПОТОКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ АУДИО (BLUETOOTH + WI-FI)

*Статья посвящена разработке аудиоустройства с поддержкой Bluetooth и Wi-Fi для передачи звука, что позволяет сочетать преимущества обеих технологий. Рассматриваются особенности каждой технологии, их совместное использование, а также технические и программные аспекты, которые обеспечивают гибкость и высокое качество воспроизведения аудио в различных условиях.*

В последние годы технологии потоковой передачи аудиосигнала значительно усовершенствовались. Всё чаще появляются устройства, которые поддерживают несколько вариантов подключения для улучшения качества передачи и удобства использования. Наиболее популярными стандартами на сегодняшний день являются Bluetooth и Wi-Fi. Эти две технологии имеют свои особенности, преимущества и недостатки, но при их совместном использовании можно создать устройство, которое будет сочетать лучшие характеристики каждой из них. В данной статье рассматривается разработка устройства, поддерживающего Bluetooth и Wi-Fi-стандарты для воспроизведения аудио.

Современные аудиоустройства, такие, как колонки, наушники, автомобильные аудиосистемы и другие, часто используют для передачи звука беспроводные технологии. Bluetooth – это стандарт, который идеально подходит для беспроводного соединения на небольшие расстояния (до 100 метров для большинства устройств), пропускная способность ограничена, что влияет на качество звука при высоких битрейтах. Wi-Fi, в свою очередь, обладает высокой пропускной способностью и подходит для потоковой передачи аудио высокого качества. Однако он менее энергоэффективен.

Комбинированное использование этих технологий позволяет разрабатывать устройства, которые могут адаптироваться к различным условиям использования, предоставляя пользователю лучшие возможности для воспроизведения аудио в разных ситуациях.

#### *Технические основы Bluetooth и Wi-Fi*

Bluetooth используется в различных устройствах, таких как наушники, мобильные телефоны, компьютеры и т. д. Он использует радиочастотные волны для передачи данных между устройствами и имеет следующие особенности:

- пропускная способность Bluetooth ограничена до 3 Мбит/с (для Bluetooth 2.0) и до 24 Мбит/с для Bluetooth 5.0. Соответственно скорость передачи данных меньше, чем у Wi-Fi, что ухудшает качество звука. Так, кодеки SBC, AAC, aptX поддерживают передачу аудио с потерями, а кодек LDAC имеет меньшие потери и более высокую битовую частоту;
- энергопотребление Bluetooth гораздо меньше в сравнении с Wi-Fi, что делает его идеальным выбором для устройств с автономным питанием, таких как беспроводные наушники и портативные колонки [1].

Wi-Fi — это технология беспроводной связи, которая использует радиоволны для передачи данных на больших расстояниях, чем

Bluetooth. Wi-Fi обладает высокоскоростной передачей данных, что идеально подходит для потоковой передачи аудио в высоком качестве.

Основные характеристики Wi-Fi:

- дальность действия может варьироваться от 50 метров в закрытых помещениях до 200 метров на открытом пространстве (в зависимости от типа роутера);

- пропускная способность: в Wi-Fi 5 (802.11ac) и Wi-Fi 6 (802.11ax) скорость передачи данных может достигать 1-10 Гбит/с, что идеально подходит для потоковой передачи аудио с высоким качеством, включая формат высокого разрешения;

- Wi-Fi имеет высокую скорость передачи, позволяющую передавать аудио в формате без потерь или с минимальными потерями (например, FLAC, ALAC);

- энергопотребление Wi-Fi больше, чем у Bluetooth, что делает его менее подходящим для портативных устройств с ограниченной емкостью аккумуляторов или батарей.

Разработка устройства, которое поддерживает как Bluetooth, так и Wi-Fi, позволяет комбинировать преимущества обеих технологий. Вот несколько основных причин, почему это важно:

- простота подключения: Bluetooth идеально подходит для использования с мобильными устройствами, такими как смартфоны и планшеты, а Wi-Fi — для более стабильной и качественной передачи аудио через интернет или локальную сеть;

- поддержка различных аудиоформатов: Wi-Fi может передавать аудио в более высоком качестве без потерь, а Bluetooth используется для подключения в ситуациях, когда важна компактность и мобильность;

- оптимизация энергопотребления: в ситуациях, когда важна автономность устройства, Bluetooth позволяет минимизировать потребление энергии. Когда важно качество передачи (например, в стационарных аудиосистемах), можно переключиться на Wi-Fi;

- долгосрочная совместимость: поддержка обеих технологий позволяет устройствам быть совместимыми с большим количеством разных устройств и сервисов, что повышает их универсальность и привлекательность для пользователей [2].

Для разработки устройства, поддерживающего обе технологии, необходимо выбрать подходящий микроконтроллер или процессор. Наиболее популярными являются чипы от компаний Qualcomm, Broadcom, MediaTek и других, которые интегрируют поддержку Bluetooth и Wi-Fi в одном решении. Эти чипы предлагают необходимые интерфейсы для работы с аудиоформатами и кодеками, а

также обеспечивают совместимость с различными стандартами связи [3].

**Аудиокодеки.** Аудиокодеки играют ключевую роль в передаче звука через Bluetooth и Wi-Fi. Для Bluetooth важно использовать кодеки с высокой сжимаемостью, но при этом с минимальными потерями качества звука. Среди популярных кодеков можно выделить:

- SBC (Sub-band Coding) – эффективный кодек передачи аудио через Bluetooth с потерями. Является базовым для передачи аудио через Bluetooth и совместим со всеми устройствами. Имеет невысокое качество звука при низких битрейтах;
- AAC (Advanced Audio Coding): патентованный формат сжатия аудио, который используется для хранения и передачи музыки и звука. Является преемником формата MP3 и предлагает более высокое качество звука при более низком битрейте;
- aptX и aptX HD: кодеки с улучшенным качеством для Bluetooth;
- LDAC – один из лучших кодеков для передачи аудио через Bluetooth с высокой битовой скоростью и минимальными потерями качества.

Для Wi-Fi можно использовать кодеки, поддерживающие аудио без потерь, такие как FLAC или ALAC, которые позволяют передавать звук в высоком качестве.

Программное обеспечение устройства должно поддерживать как Bluetooth, так и Wi-Fi стек. Для Bluetooth это стандартный Bluetooth стек, который обычно предоставляет операционная система устройства. Для Wi-Fi необходимо реализовать поддержку стандартов 802.11a/b/g/n/ac/ax, а также настройки потоковой передачи через локальную сеть или интернет. Кроме того, важно разработать приложение или встроенную систему управления, которая позволит пользователю переключаться между Bluetooth и Wi-Fi в зависимости от предпочтений и условий использования.

Одной из сложностей является обеспечение совместимости с разными устройствами и операционными системами. Например, устройства, поддерживающие Bluetooth, могут иметь разные версии этого стандарта, что может повлиять на качество и стабильность подключения.

Использование обеих технологий может привести к интерференции, особенно если устройство поддерживает Wi-Fi и Bluetooth одновременно. Это важно учитывать при проектировании устройства, а также использовать методы, снижающие вероятность помех, например, выбор каналов с наименьшей нагрузкой [4].

Разработка устройства с поддержкой нескольких потоковых технологий, таких как Bluetooth и Wi-Fi, представляет собой интересную задачу, которая открывает широкие возможности для создания гибких, многофункциональных аудиоустройств. Bluetooth идеально подходит для мобильных устройств и портативных приложений, в то время как Wi-Fi обеспечивает передачу аудио в высоком качестве и позволяет интегрировать устройства в более сложные сети.

Комбинированная поддержка этих технологий значительно расширяет функциональность устройств, повышая их привлекательность для пользователей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жилин В.В. Технологии беспроводного доступа в телекоммуникационных системах [Электронный ресурс]. – URL: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/ea9/ae183ulw51sgmwslh3ds7bf64w7fveh8/TBDS18.pdf> (дата обращения 11.03.2025).

2. Пролетарский А.В. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi : учебное пособие / [Е.В. Смирнова, А.В. Пролетарский и др.] ; под общ. ред. А. В. Пролетарского. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 446 с.

3. Баширов С.Р. Применение микроконтроллеров в звуковой технике / С.Р. Баширов, А.С. Баширов, Р.И. Авилов. – Москва: Эксмо, 2008. – 252 с.

4. Гапоненко С.В. Акустические системы своими руками. – Санкт-Петербург: Издательство «Наука и Техника», 2013. – 240 с.

УДК 004.896

### СОКОЛОВ Н.А., СКВОРЦОВ С.В.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ДАННЫХ С ВИДЕОКАМЕРЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Рассматривается программное обеспечение для детекции и улучшения изображений лиц на видео, использующее нейронную сеть YOLO v11 для обнаружения силуэтов людей в различных условиях освещения и интегрирующий алгоритм сшивания изображений лиц на основе сетки FaceMesh и Лапласова сшивания для повышения качества финальных изображений.*



Современные системы распознавания лиц, использующие нейронные сети, достигли значительных успехов в области детекции и идентификации лиц в видеоизображениях. Однако, несмотря на высокую точность в условиях хорошего освещения, задачи распознавания лиц в ночное время или при низком качестве изображения остаются актуальными. Существующие методы, основанные на традиционных подходах, часто сталкиваются с трудностями при обработке изображений, снятых под различными углами или при использовании инфракрасной подсветки.

Целью настоящей работы является разработка и анализ программного обеспечения для детекции и улучшения качества лиц на видео с использованием нейронной сети YOLO v11[1] и алгоритмов обработки изображений, включая сетку лица FaceMeshmediapipe [2] и алгоритм Лапласова сшивания [3]. В рамках исследования предложены новые методы сшивания изображений лиц, полученных под разными углами, а также способы повышения их качества с использованием нейронных сетей. Разработанное программное обеспечение реализует следующие основные функции: детекция силуэта человека в разных условиях освещенности; извлечение из видеопотока и сшивание фотографий лиц; повышение качества изображений лиц.

*Детекция силуэта человека.* Для обнаружения силуэта человека на видео применяется модель YOLO v11. Эта система способна обнаруживать силуэты людей как при дневном освещении, так и в ночное время, если видео снято с использованием инфракрасной подсветки. Выбор этой архитектуры обусловлен её способностью обеспечивать оптимальное соотношение между быстродействием и качеством работы в задаче детекции.

Процесс обучения модели для детекции включал раздельное обучение для дневного и ночного освещения. Для формирования набора данных при дневном освещении использовались наборы данных Person\_detection\_v6i\_yolov11, Person\_detection\_v15i\_yolov11. Для ночного освещения были использованы наборы данных Dataset\_IR1, PeopleDetection - Thermal.v5-resized640\_aug2xwithmosaic-accurate.yolov11, thermal.v3i.yolov11 с пещурца Roboflow[9].

В результате 30 эпох обучения для дневного освещения были получены следующие метрики: precision: 0.84, recall: 0.74, mAP50: 0.825, mAP50-95: 0.55. Для ночного освещения после 12 эпох обучения метрики составили: precision: 0.85, recall: 0.79, mAP50: 0.87, mAP50-95: 0.49. Результаты детекции для дневного и ночного режимов представлены на изображенной на рисунке 1.

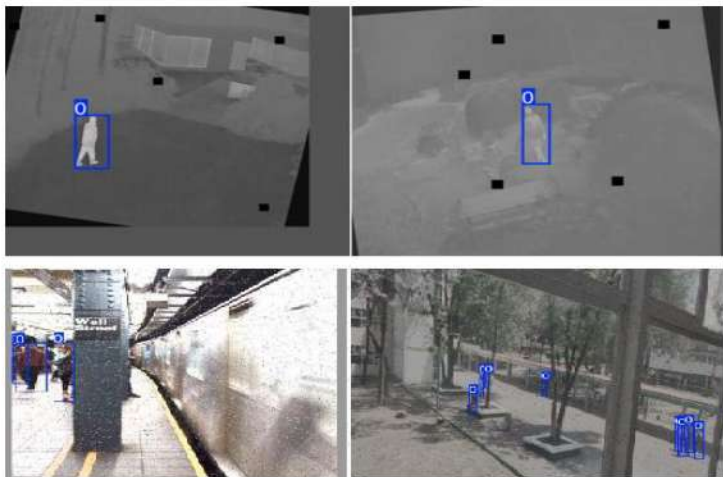


Рисунок 1 – Результаты детекции обученной модели YOLO

*Получение и соединение фотографий лиц.* Для получения фотографий лиц из видеопотока с помощью модели YOLO v11 загружается заранее обученная модель и инициализируется видеопоток. Каждый кадр видео анализируется моделью YOLO для выявления силуэтов людей, и обнаруженные области передаются на обработку детектору лиц MediaPipe. После обнаружения силуэта осуществляется выделение границ лица. Если лицо обнаружено и его вероятность превышает 0.85, координаты обнаруженного лица преобразуются для извлечения из изображения. Извлеченные фотографии лиц сохраняются в выходной каталог. После завершения обработки все ресурсы освобождаются.

Изображения лиц, полученные под различными углами, сшиваются с применением специально разработанного алгоритма, который основывается на сетке лица FaceMesh, определении оптимального угла поворота лица и алгоритме Лапласова сшивания.

Для решения задачи извлечения и сшивания фотографий лиц с видеопотока были выбраны методы, которые обеспечивают как высокую точность, так и плавность переходов между различными частями лиц. Использование MediaPipe для извлечения ключевых точек лица было выбрано из-за его высококачественного и быстрого распознавания ландмарков. Эти ключевые точки необходимы для вычисления углов наклона и размера различных элементов лица, что позволяет адаптировать их для сшивания с другими частями.

Метод Лапласовой пирамиды был выбран для сшивания лицевых частей, поскольку он эффективно справляется с интеграцией

изображений, снятых под разными углами и с различными условиями освещенности. Лапласова пирамида позволяет создать плавные переходы между частями лица, используя многомасштабную обработку изображений. Этот метод минимизирует видимость швов и различий в освещенности между сшиваемыми частями, создавая более естественный и реалистичный результат.

Для окончательной компоновки изображения был использован альфа-блендинг, который обеспечивает мягкое слияние масок и элементов изображения. Альфа-блендинг позволяет аккуратно интегрировать области с разной яркостью и цветом, устраняя резкие переходы между наложенными частями. Результат — это изображение, на котором части разных лиц сшиваются так, что создается единое, реалистичное лицо. Получение нескольких фотографий лиц (первые 3) и результат сшивания изображений лиц с разных ракурсов представлено ниже на рисунке 2.

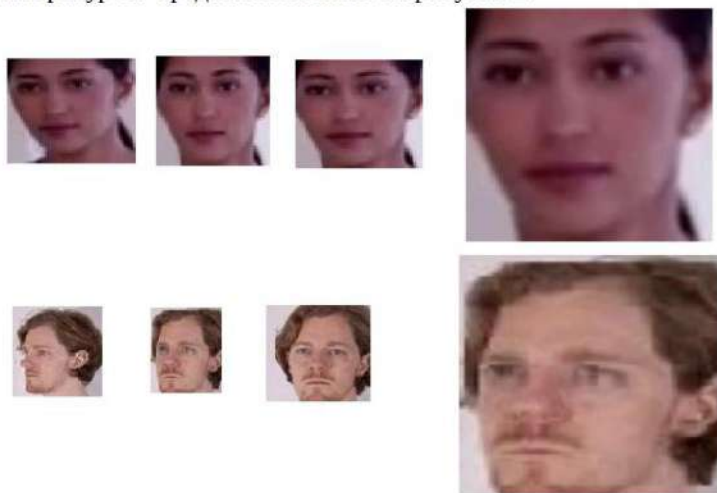


Рисунок 2 – Результаты работы алгоритма сшивания по лицевым точкам

*Восстановление качества фотографий лиц.* Для повышения качества изображения лица, полученного в результате работы алгоритма сшивания, можно использовать нейронные сети (GFPGAN [4], dfdnet[5], mrtnet[6], restoreFormer [7], pmrf [8]), которые способны восстанавливать изображения лиц. На рисунке 3 представлены результаты восстановления лица указанными средствами.

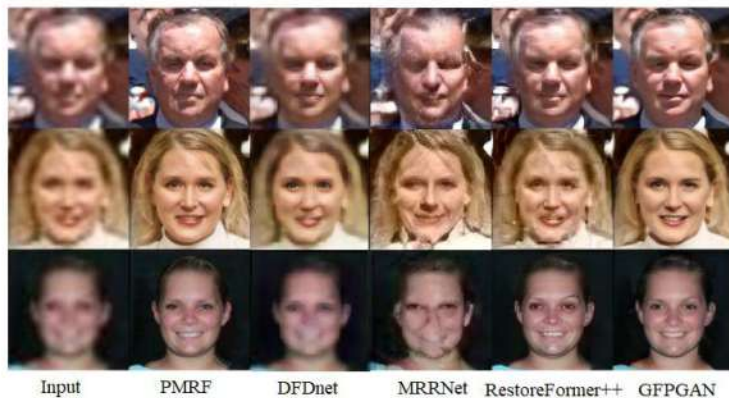


Рисунок 3 – Сравнительный анализ результатов восстановления лица различных архитектур

В результате сравнительного анализа было решено использовать архитектуру PMRF. Пример восстановления изображений лиц с использованием данной архитектуры представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Восстановление лица с использованием PMRF

*Ключевые аспекты программного обеспечения.* Разработанная система представляет собой многофункциональный телеграм-бот, реализующий комплексное управление системой видеонаблюдения. Основные функциональные модули поддерживают добавление и редактирование камер наблюдения, настройку охранных зон с

использованием полигонов произвольной формы, а также мониторинг событий с сохранением логов и фотографий инцидентов.

Подключение к камерам осуществляется по протоколу RTSP. Общий список команд, отражающий возможности системы, представлен на рисунке 5.

```
commands = [  
  BotCommand(command="/start", description="Запустить бота"),  
  BotCommand(command="/add_camera", description="Добавить (подключить) камеру"),  
  BotCommand(command="/edit_camera", description="Изменить подключенную камеру"),  
  BotCommand(command="/set_zone", description="Установить зоны охраны"),  
  BotCommand(command="/edit_guard_zone", description="Изменить зоны охраны"),  
  BotCommand(command="/start_monitoring", description="Начать мониторинг"),  
  BotCommand(command="/stop_monitoring", description="Остановить мониторинг"),  
  BotCommand(command="/get_events", description="Получить логи ( Снимки из БД)"),  
]
```

Рисунок 5 – Список команд системы

Одной из ключевых особенностей системы является реализация механизма определения охранных зон с использованием относительных координат (рисунок 6). Пользователь может задать произвольный полигон, указав координаты вершин в нормализованном виде (от 0 до 1), что обеспечивает инвариантность к разрешению исходного видео. На рисунке 6 отображено представление процесса создания охранной зоны.

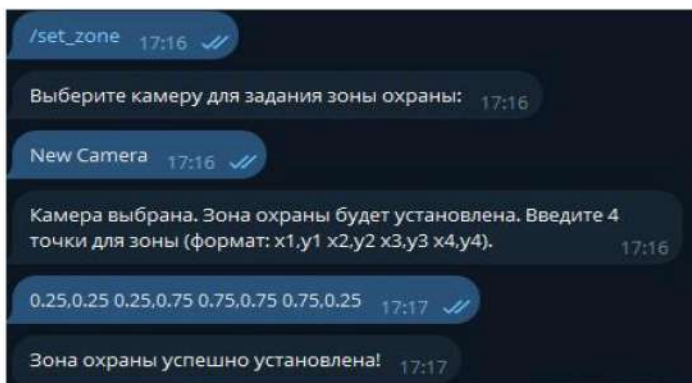


Рисунок 6 – Установление зоны охраны на камере

Для обработки асинхронных событий и управления состояниями пользовательского взаимодействия применен механизм FiniteStateMachine (FSM), что позволяет эффективно управлять сложными сценариями работы с пользователями. Реализованы различные состояния для операций редактирования камер и охранных зон.

Система обеспечивает надежное хранение данных через интеграцию с реляционной базой данных PostgreSQL с использованием библиотеки SQLAlchemy. Модель данных включает сущности User, Camera, GuardZone и Event, связанные отношениями "один-ко-многим" и "многие-к-одному".

Для параллельной обработки видеопотоков и событий используется комбинация асинхронного программирования и многопоточной обработки. В программном обеспечении реализован механизм фонового мониторинга событий с использованием очереди сообщений (event\_queue) и асинхронной обработки.

Система поддерживает работу с историческими данными, позволяя пользователям запрашивать события за определенный период с возможностью фильтрации по камере и наличию фотографий. Для выбора дат реализован календарный интерфейс SimpleCalendar.

На рисунке 7 представлен пример оповещающего сообщения, которое приходит пользователю, который включил режим мониторинга камеры, выбрал зону охраны, и в данную зону попало изображение человека.

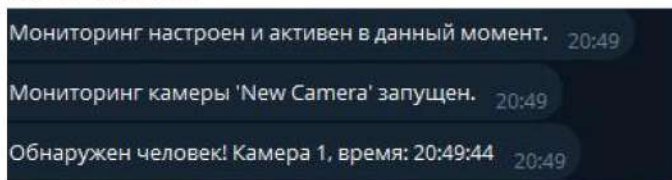


Рисунок 7 – Оповещение с камеры, подключенной к мониторингу

Важной особенностью системы является её масштабируемость и модульность, что достигается через использование современных асинхронных фреймворков (aiogram) и четкое разделение функционала на независимые модули.

**Заключение.** В работе реализован комбинированный подход, который интегрирует процессы детекции людей и лиц, с учетом различной освещенности и улучшения качества изображений, полученных в условиях низкого разрешения и под различными углами. Ожидаемые результаты могут существенно повысить точность и надежность систем видеонаблюдения и биометрической идентификации.

Разработанная программа дополнительно предоставляет возможность улучшения качества изображений лиц, полученных в результате работы алгоритма сшивания, что может быть полезно для различных областей применения, включая системы безопасности и анализа видеоданных.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. YOLO v11 [Электронный ресурс] – URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения: 29.03.2025).
2. MediaPipeFaceMesh [Электронный ресурс] – URL: <https://github.com/google-ai-edge/mediapipe> (дата обращения: 29.03.2025).
3. Лапласово сшивание [Электронный ресурс] – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Laplacian\\_pyramid](https://en.wikipedia.org/wiki/Laplacian_pyramid) (дата обращения: 29.03.2025).
4. GFPGAN: Towards Real-World Blind Face Restoration with Generative Facial Prior [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/abs/2101.04061> (дата обращения: 29.03.2025).
5. DFDNet: Deep Face Dictionary Network for Face Restoration [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/abs/2008.00418> (дата обращения: 29.03.2025).
6. Face Super-Resolution with Spatial Attention Guided by Multiscale Receptive-Field Features [Электронный ресурс] – URL: <https://github.com/SYlan2019/MRRNet> (дата обращения: 29.03.2025).
7. RestoreFormer: High-Quality Blind Face Restoration from Undegraded Key-Value Pairs [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/abs/2201.06374> (дата обращения: 29.03.2025).
8. Posterior-Mean Rectified Flow: Towards Minimum MSE Photo-Realistic Image Restoration [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/abs/2410.00418> (дата обращения: 29.03.2025).
9. Roboflow [Электронный ресурс] – URL: <https://roboflow.com> (дата обращения: 29.03.2025).

УДК 621.3.049.75

**ТЕРЕХОВ А.В.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛНОВЫХ АЛГОРИТМОВ  
ТРАССИРОВКИ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ**

*В статье рассматривается разработка и оптимизация волновых алгоритмов трассировки для применения в сложных электроустановках. Волновые алгоритмы, такие как алгоритм Ли, широко используются для поиска кратчайших путей и эффективны при решении задач трассировки. В статье описываются основные*

принципы волновых алгоритмов и их оптимизация с помощью модификаций и эвристических методов.

Волновые алгоритмы трассировки, основанные на методах поиска в ширину, являются эффективным инструментом для решения задач трассировки в сложных электроустановках. Эти алгоритмы позволяют находить кратчайшие пути между двумя точками в ориентированной сети, что важно для минимизации длины проводников и снижения затрат на материалы. В этой статье мы рассмотрим основные принципы волновых алгоритмов и их оптимизацию для повышения производительности в сложных электроустановках.

Волновые алгоритмы, такие как алгоритм Ли, широко используются в компьютерной трассировке печатных плат и соединительных проводников на поверхности микросхем. Эти алгоритмы основаны на методах поиска в ширину и эффективны при решении задач трассировки в сложных сетях. Однако в сложных электроустановках возникает необходимость оптимизировать эти алгоритмы для повышения их производительности и точности.

Волновой алгоритм включает в себя два основных этапа:

1. Формирование числовой волны: от источника к приёмнику формируется условная числовая волна. Каждой ячейке в сетке присваивается номер, начиная с ячейки №0 (источник), затем соседние ячейки обозначаются как №1, №2 и так далее до достижения конечной точки (в данном случае  $B$ ). Расстояние между точками можно вычислить по формуле:  $D = |X_i - X_B| + |Y_i - Y_B|$ , где  $X_i$  и  $Y_i$  — координаты текущей точки, а  $X_B$  и  $Y_B$  — координаты конечной точки.

2. Построение трассы: трасса строится от приёмника к источнику по фронтам числовой волны в порядке уменьшения значения фронта. Направление трассы меняется только при необходимости.

Для оценки эффективности алгоритма можно использовать формулу времени выполнения:  $T = O(n \cdot m)$ , где  $n$  и  $m$  — размеры сетки.

Оптимизация волновых алгоритмов может быть достигнута с помощью модификаций алгоритма Ли и использования эвристических методов. Например, метод встречной волны может быть использован для ускорения поиска пути. Реализация алгоритма на параллельных вычислительных системах также может существенно ускорить процесс трассировки в больших сетях.

Для оценки качества пути можно использовать весовую функцию:  $F = f_1 + f_2 + \dots + f_r$ , где  $f_i$  — весовые коэффициенты,



учитывающие различные факторы, такие как длина пути, количество поворотов и т.д.

*Способы оптимизации волновых алгоритмов*

- Модификация алгоритма Ли: используются методы путевых координат, кодирование по модулю 3 и метод Акерса для эффективного кодирования состояния ячеек.

- Метод встречных волн: одновременное распространение волн от источника и приёмника ускоряет поиск пути.

- Лучевой алгоритм: исследует не все свободные ячейки, а только по заданным направлениям, что сокращает время вычислений.

- Ограничение области трассировки: используется прямоугольник, охватывающий соединяемые выводы, что уменьшает количество обрабатываемых ячеек.

- Параллельная обработка: реализация алгоритма на параллельных вычислительных системах для ускорения трассировки в больших сетях.

- Эвристические методы: используются для оптимизации пути по различным критериям, таким как длина и количество поворотов.

- Условная оптимизация: ячейки могут быть заняты, свободны или частично заняты, что позволяет учитывать различные ограничения при трассировке.

Рассмотрим основные волновые алгоритмы. Алгоритм Ли (классический волновой алгоритм) используется для поиска кратчайшего пути в дискретной сетке. Основан на распространении волны от источника к цели с последующим построением траектории. Применяется в задачах трассировки печатных плат и соединительных проводников.

Метод встречной волны предполагает одновременное распространение волн от источника и приёмника. Ускоряет процесс поиска пути в больших сетях.

Канальный алгоритм используется для трассировки внутри заданных каналов. Ограничивает движение пути определёнными направлениями.

Эвристические алгоритмы (например, A\*) используют дополнительные правила для оптимизации пути. Применяются в задачах с высокой сложностью, где требуется учитывать множество факторов.

Лучевые алгоритмы основаны на распространении лучей от источника. Применяются для моделирования электромагнитных волн и акустических сигналов.

Применение волновых алгоритмов возможно в следующих областях:

- Трассировка в сложных электроустановках. Волновые алгоритмы позволяют эффективно прокладывать соединения между компонентами электроустановок, минимизируя длину проводников и избегая пересечений с препятствиями.

- Моделирование дифракции ползучих волн. Исследование дифракции ползучих волн на сложных поверхностях позволяет улучшить характеристики радаров и систем распознавания объектов.

- Обработка сигналов. Алгоритмы используются для формирования луча (beamforming) в радиосвязи, акустике и медицинской визуализации.

- Логистика и управление складом. Алгоритмы волновой трассировки используются для оптимизации перемещения товаров на складах и планирования маршрутов транспортных средств.

- Робототехника. Волновые алгоритмы используются для навигации роботов в замкнутых пространствах и обхода препятствий.

- Генерация изображений. Алгоритм коллапса волновой функции используется для создания битовых изображений, локально похожих на входное изображение.

- Компьютерная голография. Волновые алгоритмы используются для коррекции волновых фронтов света, проходящего через сложные среды, что улучшает качество голографических изображений в медицине, сфере безопасности и научных исследованиях.

Также волновые алгоритмы могут быть использованы для улучшения используемых решений в нижеперечисленных сферах.

- Волновые алгоритмы используются для моделирования волновых полей в сейсморазведке, что позволяет лучше понимать распространение сейсмических волн и повышать точность поиска нефти и газа.

- Применяются в компьютерном проектировании для трассировки печатных плат и соединительных проводников, что позволяет оптимизировать их расположение и уменьшить длину проводников.

- Используются в играх для поиска кратчайшего пути и навигации персонажей, что делает игровой процесс более реалистичным и эффективным.

- Могут быть применены для навигации роботов в замкнутых пространствах, что позволяет им эффективно избегать препятствий и находить оптимальные маршруты.

- Используются в обработке сигналов для формирования луча (beamforming) в радиосвязи и акустике, что улучшает качество передачи и восприятия сигналов.

- Могут быть использованы в медицинской визуализации для улучшения качества изображений и анализа данных, что помогает в диагностике и лечении заболеваний.

- Применяются для оптимизации перемещения товаров на складах и планирования маршрутов транспортных средств, что снижает затраты и повышает эффективность логистических операций.

Результаты исследования показывают, что оптимизированные волновые алгоритмы являются перспективным инструментом для решения задач трассировки в сложных электроустановках. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку новых модификаций алгоритмов и их применение в других областях, таких как робототехника и компьютерное зрение.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волновой алгоритм трассировки и пример его реализации. [Электронный ресурс] – URL: <https://lab18.ipu.ru/projects/conf2015/2/35.htm> (дата обращения 05.03.2025).

2. Автоматическая трассировка проводников печатных плат. [Электронный ресурс] – URL: <https://edu.study.tusur.ru/publications/2605/download> (дата обращения 05.03.2025).

3. Алгоритмы трассировки проводов в каналах. [Электронный ресурс] – URL: [https://www.bsuir.by/m/12\\_113415\\_1\\_67130.pdf](https://www.bsuir.by/m/12_113415_1_67130.pdf) (дата обращения 05.03.2025).

4. Волновой алгоритм Ли. [Электронный ресурс] – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC\\_%D0%9B%D0%B8](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC_%D0%9B%D0%B8) (дата обращения 05.03.2025).

5. Алгоритмы трассировки при проектировании СВИС. [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-trassirovki-pri-proektirovanii-sbis> (дата обращения 05.03.2025).

6. Алгоритмы конструкторского проектирования. [Электронный ресурс] – URL: [https://tula.msrabota.ru/content/book\\_docs/metod\\_.pdf](https://tula.msrabota.ru/content/book_docs/metod_.pdf) (дата обращения 05.03.2025).

УДК 004.932

**ТЕРЕХОВ А.В.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ  
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНСПЕКЦИИ И ТЕСТИРОВАНИЯ  
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

*Рассматриваются возможности и преимущества использования систем компьютерного зрения в контексте автоматизации контроля и тестирования печатных плат.*

Актуальность исследования использования систем компьютерного зрения в автоматизации инспекции и тестирования печатных плат обусловлена возрастающей потребностью в повышении качества и надежности электронных устройств. Современные производства сталкиваются с необходимостью быстрого и точного обнаружения дефектов на этапах изготовления, что особенно важно для обеспечения корректной работы сложных электронных систем. Применение автоматизированных систем позволяет значительно сократить время проверки, снизить человеческий фактор и повысить уровень выявляемых дефектов, что напрямую влияет на конкурентоспособность продукции и снижение издержек.

Кроме того, развитие технологий машинного обучения и компьютерного зрения предоставляет новые возможности для повышения эффективности инспекционных процессов. Современные системы способны автоматически анализировать изображения печатных плат, выявлять скрытые дефекты и отклонения с высокой точностью, что ранее было затруднительно или невозможно вручную. Актуальность исследования обусловлена необходимостью внедрения таких технологий в производство для достижения высокого уровня автоматизации, снижения затрат и повышения качества продукции в условиях растущей сложности электронных устройств и требований рынка.

Системы компьютерного зрения используют камеры для захвата изображений объектов, а затем программное обеспечение анализирует эти изображения для обнаружения дефектов или несоответствий. В случае печатных плат системы могут проверять наличие и правильное расположение компонентов, обнаруживать поверхностные дефекты, такие как трещины или окисление, и контролировать качество пайки.

Для обнаружения дефектов используется вероятностная модель, основанная на теореме Байеса. Введем следующие обозначения:

$P(D)$  – априорная вероятность наличия дефекта;

$P(\bar{D}) = 1 - P(D)$  – вероятность отсутствия дефекта;

$P(+|D)$  – чувствительность метода;

$P(+|\bar{D})$  – вероятность ложного срабатывания.

Тогда вероятность того, что обнаруженный дефект является истинным (положительная прогностическая ценность), вычисляется по формуле Байеса:  $P(D|+) = (P(+|D) \cdot P(D)) / (P(+|D) \cdot P(D) + P(+|\bar{D}) \cdot P(\bar{D}))$ .

Для численного примера, приведенного в статье:  $P(D|+) = (0.95 \cdot 0.1) / (0.95 \cdot 0.1 + 0.05 \cdot 0.9) = 0.095 / 0.14 \approx 0.6786$

Таким образом, вероятность истинного дефекта при положительном результате проверки составляет около 67.86%. Данная модель позволяет количественно оценить эффективность системы компьютерного зрения для контроля качества печатных плат.

#### *Применение в инспекции печатных плат*

Автоматическая оптическая инспекция (AOI) является ключевым методом обнаружения дефектов на печатных платах. Системы на основе искусственного интеллекта и нейронных сетей могут быстро и точно выявлять дефекты, такие как неправильная пайка или отсутствие компонентов, и оповещать операторов в режиме реального времени.

Использование 3D-сканеров позволяет не только контролировать наличие и расположение компонентов, но и проверять их размеры и высоту, что особенно важно для обеспечения правильной сборки и функциональности плат.

При 3D-сканировании используется математическая модель для реконструкции поверхности объекта. Если заданы координаты точки на поверхности, то ее положение можно описать с помощью уравнения поверхности:  $z=f(x,y)$ . Эта модель позволяет точно определять размеры и форму компонентов.

Можно выделить преимущества использования систем компьютерного зрения.

- Снижение влияния человеческого фактора. Системы компьютерного зрения исключают ошибки, связанные с человеческим фактором, такие как усталость и невнимательность, что приводит к более точной и стабильной проверке.

- Повышение скорости обработки. Автоматизированные системы могут обрабатывать большие объемы продукции за короткое время, что увеличивает производительность и снижает производственные затраты.

Использование систем компьютерного зрения для проверки и тестирования печатных плат открывает новые возможности для повышения качества и эффективности производства. Эти системы не только автоматизируют процесс проверки, но и обеспечивают точность и скорость, что делает их незаменимым инструментом в современной промышленности.

Для определения достоверности выявления дефектов при автоматизированном контроле печатных плат применяется вероятностный подход на основе теоремы Байеса. В расчете учитываются следующие параметры:

- Чувствительность метода (вероятность правильного обнаружения дефекта): 95%.
- Распространенность дефектов в производстве: 10%.
- Вероятность ложного срабатывания системы: 5%.
- Вероятность отсутствия дефекта: 90%.

Проведенные вычисления показывают, что при положительном результате проверки вероятность реального наличия дефекта составляет около 67,86%. Это означает, что в примерно 68 случаях из 100 система корректно идентифицирует действительные дефекты, а в остальных 32 случаях может иметь место ложное срабатывание.

Системы автоматизированного контроля на основе компьютерного зрения демонстрируют значительные преимущества в промышленном производстве печатных плат. Они обеспечивают:

- Высокую скорость обработки, существенно превышающую возможности ручного контроля.
- Стабильную точность обнаружения дефектов на уровне 95%.
- Снижение производственных издержек за счет автоматизации.
- Минимизацию человеческого фактора.

Таким образом, современные методы проверки и тестирования печатных плат значительно эволюционировали благодаря внедрению систем компьютерного зрения. Эти технологии позволяют автоматически обнаруживать дефекты, такие как короткие замыкания, разрывы дорожек и неправильное расположение компонентов, что существенно повышает качество и надежность продукции. Использование высокоточных камер и алгоритмов обработки изображений обеспечивает быстрое и точное сканирование поверхности платы, снижая человеческий фактор и уменьшая временные затраты на контроль.

Одним из ключевых преимуществ систем компьютерного зрения является возможность автоматической диагностики в режиме реального времени. Современные алгоритмы способны анализировать

изображения в нескольких ракурсах и с высоким разрешением, выявляя мельчайшие дефекты, которые сложно обнаружить при визуальном осмотре человеком. Это особенно важно при массовом производстве печатных плат, где требуется высокая скорость проверки без потери точности. Внедрение таких систем позволяет повысить качество продукции и снизить процент брака.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ходатаева Т.С., Каширин Н.В., Аверина А.И., Гурьянов А.Е. Подходы к разработке системы обнаружения дефектов печатных плат на основе технологии АОИ. Труды ИСП РАН, том 35, вып. 4, 2023 г., стр. 109–120.

2. Гормаков А.Н., Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств. Печатные платы. – Учебное пособие.– Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 164 с.

3. Разработка автоматизированной системы управления диагностики печатных плат на основе машинного зрения. [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-avtomatizirovannoy-sistemy-upravleniya-diagnostikoy-pechatnyh-plat-na-osnove-mashinnogo-zreniya> (дата обращения 05.03.2025).

4. Инфоурок. ИП по информатике «Компьютерное зрение». [Электронный ресурс] – URL: <https://infourok.ru/ip-po-informatike-kompyuternoe-zrenie-4217274.html> (дата обращения 05.03.2025).

УДК 004.032.26

### ТРОХИМЧУК В.В.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РАЗМЕЩЕНИИ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

*В статье рассматривается применение искусственных нейронных сетей для решения задачи размещения блоков электронно-вычислительных средств. Представлен анализ существующих подходов и предложен новый метод оптимизации размещения на основе глубокого обучения. Описаны преимущества использования нейронных сетей по сравнению с традиционными алгоритмами размещения, а также приведены практические примеры с результатами экспериментов. Показано, что применение нейросетевых подходов позволяет значительно улучшить качество размещения и повысить энергоэффективность проектируемых систем.*

Задача размещения блоков электронно-вычислительных средств (ЭВС) является одной из ключевых проблем в проектировании вычислительных систем. От правильного размещения зависит эффективность работы системы, энергопотребление и тепловой режим. По мере увеличения сложности современных вычислительных систем, задача оптимального размещения блоков становится всё более критичной. Современные микропроцессоры и вычислительные платформы содержат миллионы компонентов, оптимальное размещение которых представляет собой сложную многокритериальную задачу оптимизации.

Традиционные методы решения этой задачи основаны на эвристических алгоритмах и не всегда дают оптимальный результат. В последние годы всё большее внимание уделяется применению искусственных нейронных сетей для решения подобных задач, поскольку они способны автоматически обнаруживать скрытые закономерности в данных. Методы машинного обучения демонстрируют высокую эффективность в решении задач оптимизации со множеством переменных и ограничений, каковой является задача размещения блоков ЭВС.

Традиционные методы размещения блоков ЭВС включают:

- Алгоритмы на основе графов, представляющие блоки как вершины, а соединения как рёбра. Эти алгоритмы используют теорию графов для минимизации длины соединений и оптимизации топологии размещения.

- Эвристические методы, использующие набор эмпирических правил для получения приемлемого решения. Эти методы основаны на опыте разработчиков и практических рекомендациях по размещению компонентов.

- Генетические алгоритмы, имитирующие процесс естественного отбора. Они рассматривают множество вариантов размещения как популяцию, которая эволюционирует с целью выявления наиболее оптимальных решений.

- Методы локального поиска, последовательно улучшающие решение путем итеративных локальных изменений. К таким методам относятся алгоритм имитации отжига и поиск с запретами, позволяющие избегать локальных оптимумов.

- Многоуровневые методы размещения, которые сначала создают укрупненное представление задачи, решают её, а затем последовательно уточняют полученное решение.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Например, алгоритмы на основе графов быстры, но не учитывают



тепловые характеристики. Генетические алгоритмы могут находить глобальный оптимум, но часто требуют большого времени вычисления. Эвристические методы быстры, но качество получаемых решений сильно зависит от конкретной задачи и начальных условий.

Нейронные сети предлагают следующие преимущества при решении задачи размещения блоков ЭВС:

- Способность к обучению на основе исторических данных о размещении систем. Нейронные сети могут анализировать предыдущие успешные проекты и извлекать из них скрытые закономерности оптимального размещения.

- Быстрая обработка больших объемов информации о характеристиках блоков и их взаимосвязях. После обучения нейронная сеть способна быстро генерировать решения даже для сложных систем.

- Возможность учета множества параметров одновременно, включая электрические, тепловые и механические характеристики. Это позволяет находить более сбалансированные решения.

- Адаптивность к изменяющимся условиям и требованиям проектирования. Нейронные сети могут быть дообучены при изменении параметров задачи.

- Возможность использования методов обучения с подкреплением для непрерывного улучшения качества размещения в процессе эксплуатации системы.

- Масштабируемость решений для систем различной сложности и размерности. Архитектура нейронной сети может быть адаптирована под конкретную задачу.

#### *Архитектуры нейронных сетей для задачи размещения*

Для решения задачи размещения блоков ЭВС применяются различные архитектуры нейронных сетей, каждая из которых имеет свои особенности и области применения:

##### 1. Сверточные нейронные сети (CNN)

Сверточные сети эффективны для обработки двумерных пространств размещения. Они могут обнаруживать пространственные зависимости между блоками и учитывать геометрические особенности размещения. CNN особенно хорошо подходят для задачи размещения, так как:

- Сохраняют пространственную структуру данных, что важно для двумерного размещения.

- Обнаруживают локальные закономерности между соседними блоками.

- Сокращают количество обучаемых параметров благодаря разделению весов.

- Иерархически извлекают признаки разного уровня абстракции.

Пример архитектуры CNN для задачи размещения на языке C++:

```
#include <torch/torch.h>
#include <iostream>
class PlacementCNN : public torch::nn::Module {
public:
    PlacementCNN(int64_t input_channels, int64_t
input_height, int64_t input_width, int64_t output_size)
        : conv1(torch::nn::Conv2dOptions(input_channels,
32, 3).padding(1)), // Первый сверточный слой: входные
каналы -> 32 фильтра размером 3x3
          conv2(torch::nn::Conv2dOptions(32, 64,
3).padding(1)), // Второй сверточный слой: 32
-> 64 фильтра размером 3x3
          conv3(torch::nn::Conv2dOptions(64, 128,
3).padding(1)), // Третий сверточный слой: 64
-> 128 фильтров размером 3x3
          pool(torch::nn::MaxPool2dOptions(2).stride(2))
// Слой пулинга: уменьшает размер в 2 раза
    {
        // Регистрация модулей в PyTorch для
отслеживания параметров
        register_module("conv1", conv1);
        register_module("conv2", conv2);
        register_module("conv3", conv3);
        // Расчет размера входа для полносвязного слоя
после сверток
        // После двух слоев пулинга размер уменьшается в
4 раза
        int64_t fc_input_size = 128 * (input_height/4) *
(input_width/4);
        // Создание и регистрация полносвязных слоев
        fc1 = register_module("fc1",
torch::nn::Linear(fc_input_size, 128)); // Полносвязный
слой: fc_input_size -> 128 нейронов
        fc2 = register_module("fc2",
torch::nn::Linear(128, 64)); // Полносвязный
слой: 128 -> 64 нейрона
        fc3 = register_module("fc3",
torch::nn::Linear(64, output_size)); // Выходной
слой: 64 -> output_size нейронов
    }
    torch::Tensor forward(torch::Tensor x) {
```

```

// Сверточная часть с активациями ReLU и пулингом
x = pool(torch::relu(conv1(x))); // Применение
первого сверточного слоя, ReLU и пулинга
x = pool(torch::relu(conv2(x))); // Применение
второго сверточного слоя, ReLU и пулинга
x = torch::relu(conv3(x)); // Применение
третьего сверточного слоя и ReLU
// Преобразование многомерного тензора в
вектор для полносвязных слоев
x = x.view({x.size(0), -1});
// Полносвязная часть с активациями ReLU
x = torch::relu(fc1(x)); // Первый полносвязный
слой с ReLU
x = torch::relu(fc2(x)); // Второй полносвязный
слой с ReLU
x = fc3(x); // Выходной слой без активации (для
регрессии координат)
return x;
}
private:
torch::nn::Conv2d conv1, conv2, conv3; //
Сверточные слои
torch::nn::MaxPool2d pool; // Слой пулинга
torch::nn::Linear fc1{nullptr}, fc2{nullptr},
fc3{nullptr}; // Полносвязные слои
};

```

## 2. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning)

Особенно эффективным подходом является применение обучения с подкреплением, где модель получает вознаграждение за оптимальное размещение блоков. Этот подход позволяет формулировать задачу размещения как последовательный процесс принятия решений, где каждое решение влияет на последующие. Преимущества RL в задаче размещения:

- Возможность оптимизации долгосрочных критериев качества.
- Адаптация к изменениям в условиях задачи.
- Учет предыдущих решений при размещении каждого нового блока.
- Баланс между исследованием новых решений и использованием известных хороших стратегий.

Пример упрощенной реализации Q-Learning агента на C++:

```

#include <iostream>
#include <vector>
#include <random>
#include <algorithm>

```

```

class QLearningAgent {
public:
    QLearningAgent(int state_size, int action_size,
double learning_rate = 0.01, double discount_factor =
0.95, double exploration_rate = 1.0)
        : state_size_(state_size),
          action_size_(action_size),
          learning_rate_(learning_rate),
          discount_factor_(discount_factor),
          exploration_rate_(exploration_rate),
          exploration_min_(0.01), // Минимальная
вероятность исследования
          exploration_decay_(0.995), // Коэффициент
затухания исследования
          q_table_(state_size,
std::vector<double>(action_size, 0.0)) {}
// Инициализация Q-таблицы нулями
    int selectAction(int state) {
        std::uniform_real_distribution<double> dist(0.0,
1.0); //Равномерное распределение от 0 до 1
        if (dist(random_engine_) <= exploration_rate_) {
//Проверка на исследование
            // Режим исследования - выбор случайного
действия
            std::uniform_int_distribution<int>
action_dist(0, action_size_ - 1);
            return action_dist(random_engine_); }
        // Режим использования - выбор действия с
максимальным Q-значением
        return std::distance(
            q_table_[state].begin(),
            std::max_element(q_table_[state].begin(),
q_table_[state].end())) // Поиск максимального элемента
        ); }
    void updateQTable(int state, int action, double
reward, int next_state) {
        double old_value = q_table_[state][action]; //
Текущее Q-значение
        double next_max =
*std::max_element(q_table_[next_state].begin(),
q_table_[next_state].end()); // Максимальное Q-значение
в новом состоянии
        // Применение формулы обновления Q-значения
        double new_value = (1 - learning_rate_) *
old_value +
            learning_rate_ * (reward +
discount_factor_ * next_max);

```

```
        q_table_[state][action] = new_value; //  
Обновление Q-значения  
        // Уменьшение вероятности исследования с  
течением времени (эксплуатация найденных решений)  
        if (exploration_rate_ > exploration_min_) {  
            exploration_rate_ *= exploration_decay_  
        }  
    }  
private:  
    int state_size_; // Размер пространства состояний  
    int action_size_; // Размер пространства действий  
    double learning_rate_; // Скорость обучения  
    double discount_factor_; // Коэффициент  
дисконтирования  
    double exploration_rate_; // Текущая вероятность  
исследования  
    double exploration_min_; // Минимальная вероятность  
исследования  
    double exploration_decay_; // Коэффициент затухания  
вероятности исследования  
    std::mt19937 random_engine_{std::random_device() {}};  
// Генератор случайных чисел  
    std::vector<std::vector<double>> q_table_; // Q-  
таблица: состояние -> действие -> Q-значение };
```

### 3. Графовые нейронные сети (GNN)

Для задач размещения, где важны взаимосвязи между компонентами, эффективны графовые нейронные сети. Они работают непосредственно с графовыми структурами, представляющими топологию соединений между блоками. GNN особенно полезны, когда:

- Схема имеет сложную нерегулярную структуру соединений.
- Необходимо минимизировать длины соединений с учетом их важности.
- Требуется учитывать взаимовлияния физически близких компонентов.

В данной работе предлагается использовать гибридную архитектуру, сочетающую преимущества сверточных сетей и обучения с подкреплением. Данная архитектура разработана с учетом специфики задачи размещения блоков ЭВС и включает следующие ключевые компоненты:

- Принимает на вход параметры блоков ЭВС (размеры, энергопотребление, тепловыделение) и ограничения размещения (габариты платы, запрещенные зоны, минимальные расстояния).

- Использует сверточные слои для извлечения пространственных особенностей области размещения, что позволяет учитывать взаимное расположение блоков.

- Применяет алгоритм глубокого Q-обучения для оптимизации размещения с учетом долгосрочных выгод, таких как эффективность охлаждения и минимизация энергопотребления.

- Генерирует оптимальную схему размещения, минимизируя длину соединений, тепловое распределение и энергопотребление при соблюдении всех технологических ограничений.

Ключевой особенностью предлагаемого метода является введение тепловой карты как дополнительного входа модели, что позволяет учитывать тепловое взаимодействие между блоками. Тепловая карта строится на основе физической модели распространения тепла и учитывает тепловыделение каждого компонента, теплопроводность материалов и наличие элементов охлаждения.

Архитектура модели также включает механизм внимания (attention mechanism), который позволяет системе фокусироваться на наиболее важных взаимосвязях между компонентами. Это особенно ценно для больших систем с сотнями и тысячами компонентов, где прямой учет всех взаимодействий вычислительно неэффективен.

Для обучения модели используется комбинированная функция потерь, учитывающая несколько факторов:

```
torch::Tensor combinedLoss(  
    const torch::Tensor& predicted_placement,  
    // Предсказанное размещение  
    const torch::Tensor& target_placement,  
    // Целевое размещение  
    const torch::Tensor& connection_matrix,  
    // Матрица соединений  
    const torch::Tensor& thermal_constraints,  
    // Тепловые ограничения  
    double alpha = 0.4, // Вес ошибки размещения  
    double beta = 0.3, // Вес ошибки длины соединений  
    double gamma = 0.3 // Вес ошибки теплового режима  
) { // Базовая ошибка размещения (MSE)  
    torch::Tensor placement_loss =  
    torch::mse_loss(predicted_placement, target_placement);  
    // Потери по длине соединений  
    torch::Tensor connection_loss =  
    calculateConnectionLength(predicted_placement,  
    connection_matrix);  
    // Потери по тепловому режиму
```

```
torch::Tensor thermal_loss =  
calculateThermalViolation(predicted_placement,  
thermal_constraints);  
// Комбинированные потери  
return alpha * placement_loss + beta *  
connection_loss + gamma * thermal_loss; }
```

Процесс обучения модели включает несколько этапов:

1. Предварительное обучение на синтетических данных, сгенерированных на основе известных принципов проектирования
2. Дообучение на реальных примерах успешных проектов
3. Тонкая настройка с использованием обучения с подкреплением в симулированной среде

Для ускорения обучения используется метод переноса обучения (transfer learning), позволяющий использовать знания, полученные при решении похожих задач.

Проведенные эксперименты на различных конфигурациях вычислительных систем показали значительные преимущества предложенного метода:

1. Эффективность размещения:
  - Улучшение плотности упаковки компонентов на 15-20% по сравнению с традиционными методами.
  - Сокращение средней длины соединений на 25% относительно генетических алгоритмов.
  - Более равномерное распределение тепла по площади платы, снижение пиковых температур на 12°C.
  - Уменьшение количества пересечений проводников на 30%, что упрощает трассировку.
2. Производительность вычислений:
  - Сокращение времени расчета на 30% для крупных систем с более чем 1000 компонентов.
  - Линейная масштабируемость для систем с большим числом блоков, в отличие от экспоненциального роста вычислительной сложности традиционных методов.
  - Возможность параллельной обработки на GPU, ускоряющая процесс размещения в 5-10 раз.
3. Энергоэффективность и надежность:
  - Снижение энергопотребления системы на 10-15% благодаря оптимизации длины соединений и теплового режима.
  - Улучшение теплового режима системы, что повышает надежность и продлевает срок службы компонентов.
  - Снижение вероятности отказов на 18% за счет более равномерного распределения тепловой нагрузки.

Тестирование проводилось на наборе из 25 различных конфигураций, включающих как малые системы (до 100 компонентов), так и крупные (более 5000 компонентов). Для объективного сравнения использовались одинаковые начальные условия и ограничения для всех алгоритмов.

Ниже представлены результаты работы методов размещения для системы средней сложности (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение результатов различных методов

Метод размещения	Время расчета (сек)	Длина соединений (отн.ед.)	Макс. температура (°С)	Энергопотребление (Вт)
Жадный алгоритм	12	1.00	78	120
Генетический алгоритм	185	0.82	72	112
Алгоритм отжига	97	0.75	70	108
Предложенный метод (NN)	68	0.62	65	103

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенного подхода и его практической ценности для проектирования современных вычислительных систем.

Применение нейронных сетей для размещения блоков ЭВС позволяет получить более эффективные решения по сравнению с традиционными методами. Предложенный гибридный подход, объединяющий сверточные нейронные сети и методы обучения с подкреплением, демонстрирует значительные преимущества по всем ключевым показателям: плотности размещения, тепловому режиму и энергопотреблению.

Результаты экспериментов подтверждают эффективность предложенного метода и его потенциал для применения в системах автоматизированного проектирования вычислительных систем. Полученное решение может быть интегрировано в существующие САПР и использовано как на этапе проектирования новых систем, так и для оптимизации существующих.

В дальнейших исследованиях планируется расширить модель для учета динамических изменений нагрузки и долгосрочного планирования размещения с учетом жизненного цикла системы и возможного развития её компонентов. Другим перспективным



направлением является адаптация разработанного подхода для трехмерного размещения компонентов в современных многослойных конструкциях и системах в корпусе.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Иванов И.И. Современные методы размещения блоков ЭВМ / И. И. Иванов. – М.: Наука, 2020. – 256 с.
2. Сидоров С.С. Оптимизация размещения компонентов вычислительных систем / С.С. Сидоров. – Новосибирск: НГУ, 2022. – 84 с.
3. LeCun Y. Deep Learning for Electronic Design Automation: A Comprehensive Review / Y. LeCun, G. Hinton // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2023. – Т. 34, № 5. – С. 2215-2234.

УДК 004.8

**ФЕТИСОВ А.А.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В САД СИСТЕМАХ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*В данной статье рассматриваются возможности и условия применения искусственного интеллекта в САД системах для реализации дизайна, описание проблем и конфликтов в 3D-моделях и помощи в их устранении, адаптации конструкции изделия под конкретное производственное оборудование.*

Современное промышленное производство требует эффективных методов создания и адаптации 3D-моделей под конкретные технологические задачи.

Целью данной статьи является показать возможности интеграции нейросетей (и, как следствие, искусственного интеллекта) и САПР для увлечения эффективности и производительности проектирования технических устройств на современном производстве.

Автоматизация проектирования с использованием искусственного интеллекта и нейросетей сокращает сроки разработки, повышает точность моделей и оптимизирует их под производственное оборудование.

Первым и ключевым направлением такого подхода стало внедрение генеративного проектирования (генеративного дизайна) как модуля или отдельной функции в современные САПР. Системы инженерного анализа CAE анализируют требования к прочности, весу и материалам, и предлагают варианты конструкций будущего изделия на основе алгоритмов машинного обучения, а модуль CAD генерирует 3D модель. Например, при проектировании авиационных кронштейнов искусственный интеллект (ИИ на базе нейросети) предлагает значительно более облегченные варианты изделия, сокращая массу на 20–40% при сохранении прочности и несущей способности конструкции.

Вторым направлением такого подхода стала интеграция CAD-систем и нейросетей (а впоследствии ИИ) с производственными процессами для проверки 3D моделей на соответствие возможностям оборудования. Алгоритмы машинного обучения в этом случае учитывают параметры станков ЧПУ, 3D-принтеров и литейных установок, корректируя созданную геометрию для обеспечения технологичности и скорости производства. Особенно это важно для сложных и прецизионных изделий.

Последним направлением такого подхода стала проверка автоматизации подготовки документации сгенерированной на основе 3D-моделей, чертежей, технических условий и спецификации, на соблюдение стандартов и нормативов.

Одним из примеров такой интеграции САПР и ИИ является программное обеспечение Autodesk Fusion 360 Generative Design. Данный пакет представляет собой передовое решение для автоматизированного создания оптимальных конструкций изделий на основе генеративного дизайна. Данная технология позволяет существенно ускорить процесс разработки деталей и узлов, обеспечивая при этом высокие показатели эффективности и надежности. Принцип работы системы основан на использовании алгоритмов искусственного интеллекта, которые анализируют заданные инженером параметры:

- рабочие нагрузки и условия эксплуатации,
- ограничения по массе и габаритам,
- доступные материалы и способы производства,
- бюджетные ограничения.

После ввода исходных данных система генерирует множество вариантов конструкции, каждый из которых соответствует установленным требованиям. Особенностью Fusion 360 является возможность учитывать специфику различных производственных

процессов, адаптирую 3D модели под нужды конкретной технологии например:

- субтрактивное производство (фрезерование, токарная обработка),
- аддитивные технологии (3D-печать),
- литьевые методы.

Также важным преимуществом Fusion 360 Generative является тесная интеграция с другими модулями CAD/CAM/CAE, что обеспечивает сквозной рабочий процесс от концепции до готового изделия. Система автоматически готовит модели для последующего анализа методом конечных элементов и генерации управляющих программ (G-code) для станков с ЧПУ.

Другим примером является ПО PTC Creo Generative Design. Данное ПО представляет собой мощный инструмент для инженеров, позволяющий автоматизировать процесс создания оптимальных конструкций с учетом производственных требований. Система работает на основе заданных пользователем параметров: действующих нагрузок, ограничений по массе и габаритам, выбранных материалов и технологических возможностей предприятия. После ввода исходных данных программа анализирует тысячи возможных вариантов конструкции, отбирая наиболее эффективные решения с точки зрения прочности, веса и технологичности изготовления.

Особенностью Creo Generative Design является глубокая интеграция с традиционными инструментами параметрического моделирования, что позволяет плавно переходить от концептуального проектирования к детальной проработке. Система автоматически учитывает особенности различных производственных процессов, включая механическую обработку на станках с ЧПУ, литье под давлением и аддитивные технологии. Например, при подготовке модели для 3D-печати алгоритмы оптимизируют структуру внутренних полостей и толщину стенок, а для фрезерования - предусматривают необходимые технологические уклоны и радиусы.

Важным преимуществом является двусторонняя связь с модулями инженерного анализа. Сгенерированные модели автоматически проверяются на прочность, жесткость и термические деформации, при необходимости дорабатываются. Для производственных цехов система готовит полный комплект документации, включая чертежи с допусками и управляющие программы для станков с ЧПУ. Это значительно сокращает цикл от проектирования до выпуска готовой продукции.

Практическое применение подобных технологий демонстрируют впечатляющие результаты. Например, при проектировании элементов шасси для транспортных средств система позволяет сократить массу компонентов на 25-30% при одновременном увеличении прочностных характеристик. Внедрение данной технологии в производственные процессы позволяет предприятиям достигать значительного сокращения сроков разработки (до 50%), уменьшения материалоемкости изделий и повышения их эксплуатационных характеристик. При этом сохраняется возможность инженерного контроля и ручной доработки предлагаемых решений.

Таким образом внедрение ИИ и нейросетей в процесс разработки сокращает сроки вывода продукции на рынок, снижает себестоимость и повышает качество изделий. Дальнейшее развитие предполагает глубокую интеграцию с производственными линиями и создание комплексных решений «от концепции до готового изделия».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Генеративное проектирование, оптимизация топологии. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.irisoft.ru/products/creo/generativnyj-dizajn-v-creo/?ysclid=m9bdokuwfc456785881> (дата обращения 05.04.2025).
2. Simple Autodesk fusion 360 generative design tutorial. [Электронный ресурс] – URL: <https://creativeidee.github.io/autodesk-fusion-360-generative-design-tutorial/> (дата обращения 07.04.2025).

УДК 004.65

**ХАЛИКОВ А.Х.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ УЗЛОВ И БЛОКОВ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

*В данной статье рассматривается проблема высокой стоимости готовых модульных автоматизированных систем для проверки узлов и блоков бортовой радиолокационной станции (БРЛС), а также большой траты времени при ручной проверке с использованием специализированных рабочих мест предприятий, занимающихся разработкой БРЛС.*

Системы проверки узлов и блоков БРЛС относятся к специализированной аппаратуре. Предприятия, занимающиеся

выпуском радиолокационных систем, имеют специализированные рабочие места для каждого узла и блока. Данные рабочие места собираются в соответствии с количеством параметров блоков БРЛС, поэтому имеют необходимый набор измерительной и контрольно-проверочной аппаратуры. Каждое рабочее место является индивидуальным и всегда планируется и собирается инженерным составом предприятия. По данной причине готовые рабочие места серийно не изготавливаются и являются единичными на предприятии, что повышает стоимость их создания и комплектования.

Большинство заводов-изготовителей специализированной аппаратуры предпочитают самостоятельно изготавливать необходимые комплектующие, либо закупать их по специальным заказам для соблюдения качества выпускаемой продукции. Однако при этом данные комплектующие чаще всего оказываются пригодными только для использования в данной спецаппаратуре, поэтому выпускаются обычно мелкими сериями, либо поштучно, что также приводит к увеличению их стоимости.

Такие фирмы, как АО «Акметрон», «ИРИТ», «Элизприбор», АО «НППО имени М.В. Фрунзе» и другие на базе измерительной аппаратуры известных фирм (Keysight technologies, Rohde & Schwarz, Rigol, Ceyear) успешно создают готовые системы для различных заказчиков и с различным функционалом. Такие системы отличаются универсальностью и созданы для решения узкоспециализированных радиолокационных задач.

Данный факт значительно увеличивает стоимость данных систем по сравнению с рабочими местами, создаваемыми в лабораторных условиях на предприятиях. Стоимость подобных автоматизированных систем достигает десятков миллионов рублей.

В большинстве случаев на предприятиях проверки узлов и блоков БРЛС выполняются в ручном или полуавтоматизированном режимах. Регулировщики и инженеры путем нажатия кнопок или использования настроенных таблиц переключают нужные частоты или включают необходимые функции на измерительных приборах. Данные операции требуют больших временных затрат, что увеличивает время проверки, настройки и регулировки узлов и блоков БРЛС.

Внедрение автоматизированной системы для проверки узлов и блоков БРЛС позволит выполнять автоматическую проверку необходимых параметров узлов и блоков, а также помочь регулировщикам при их настройке и регулировке.

Структурная схема автоматизированного рабочего места представлена на рисунке 1.

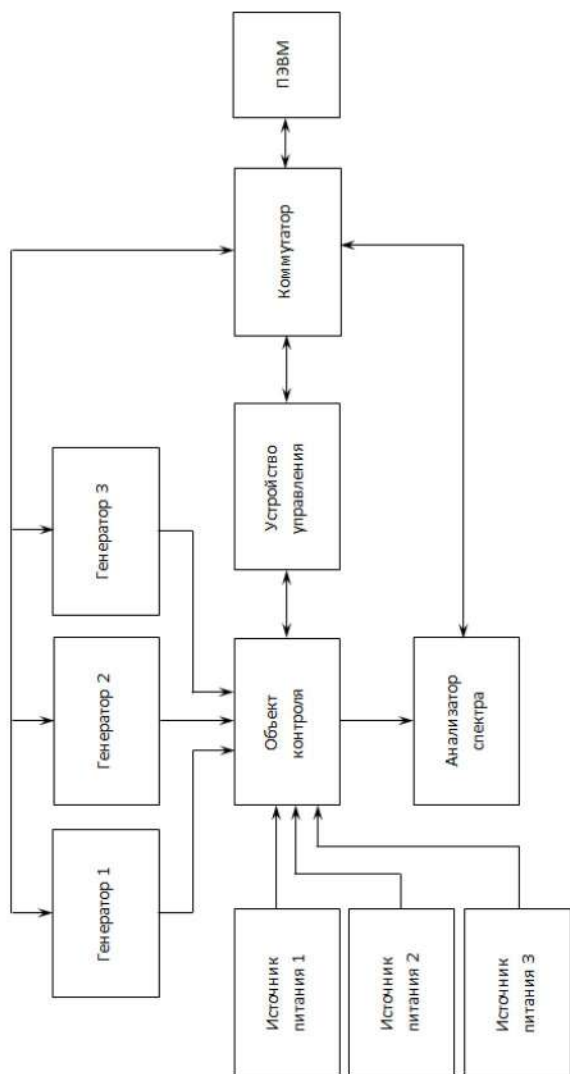


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированного рабочего места

В данную схему входит проверяемый объект контроля (узел или блок БРЛС). Питание объекта контроля осуществляется с помощью источников питания. Для подачи сигналов определенной частоты и амплитуды необходимы генераторы сигналов. Выходные сигналы подаются на анализатор спектра, измеряются и запрашиваются ПЭВМ

для обработки. Устройство управления необходимо для обмена информацией между объектом контроля и ПЭВМ, а также для формирования управляющих сигналов узлов или блоков. Подключение всех измерительных устройств схемы к ПЭВМ осуществляется с помощью коммутатора по сети Ethernet.

ПЭВМ в схеме является «мозговым» устройством, выполняющее управление измерительными приборами, устройством управления и через него объектом контроля.

Для автоматизации данного рабочего места для ПЭВМ разработано специализированное программное обеспечение в среде программирования Lazarus с использованием Delphi-программы.

Использование автоматизированной проверки узлов и блоков бортовой радиолокационной станции дает возможность получить следующие преимущества:

- значительно уменьшить затрачиваемое на проверку время;
- уменьшить время на стыковку (расстыковку) кабельной сети;
- исключить ошибки оператора, вызванные невнимательностью;
- сформировать необходимые протоколы в электронном виде.

Основные временные затраты на выполнение тех или иных операций при нынешней организации проверок узлов и блоков и при использовании автоматизации приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Временные затраты на выполнений операций

Операция	Операций за проверку (Среднее)	Время на операцию при ручной проверке (Сек.)	Сумма (Секунды)	Время на операцию при использовании автоматизации (Сек.)	Сумма (Секунды)
Ввод параметров измерительных приборов	40	15	600	1	40
Стыковка/расстыковка кабелей	30	20	600	0	0
Изменение режимов измерительных приборов	40	20	800	1	40
Выполнение проверок	15	90	900	10	150

Оформление протокола проверки	15	10	150	1	15
Итого секунд			3500		245

Исходя из расчетов по таблице 1, с введением автоматизации планируется сокращение рабочего времени на выполнение операций сотрудниками предприятий на более чем на 50 минут рабочего времени за одну проверку узла или блока. При этом введение автоматизации позволит увеличить качество выполняемых операций путем уменьшения ошибок работы специалистов.

В итоге, применение такой системы должно уменьшить в несколько раз временные затраты на весь производственный процесс узлов и блоков БРЛС, что в свою очередь приведет к увеличению выпуска продукции при тех же затратах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т.1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. /Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: «Радиотехника», 2006. – 656 с.

2. Модульные приборы. [Электронный ресурс] – URL: <https://akmetron.ru/catalog/categories/izmeritelnoe-oborudovanie/modulnye-pribory/> (дата обращения 13.04.25).

УДК 681.51.01

#### ХРЮКИН В.И.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПО ЕЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

*Рассматриваются вопросы определения частотных характеристик динамической системы, описываемой линейным дифференциальным уравнением произвольного порядка, на основе анализа передаточной функции системы.*

Во многих технических системах часто входной сигнал  $x_1(t)$  изменяется по гармоническому закону заданной амплитуды и частоты. При этом ставится задача нахождения параметров колебаний на



выходе системы  $x_2(t)$  или отдельного ее звена при известном значении на входе. Такие характеристики описывают не только частотные свойства системы, но и позволяют в случае систем автоматического управления определять их устойчивость и качество [1].

Обобщенную схему рассматриваемой системы при отсутствии возмущения, можно представить следующим образом (рисунок 1).



Рисунок 1 – Обобщенная схема системы

Пусть в соответствии с требованиями функционирования системы на ее вход подаётся сигнал, изменяющийся по закону

$$x_1(t) = A_1 \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $A_1$  – амплитуда;  $\omega$  – круговая частот рад/с. На выходе линейного звена после окончания переходного процесса также будет гармонический сигнал той же частоты, но с другой амплитудой  $A_1$  и начальной фазой  $\psi$  :

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \psi). \quad (2)$$

#### Теоретическая часть

В работе [1] предлагается найти связь между входной и выходной величинами, воспользовавшись формулой Эйлера [2]. Тогда для выражений (1), (2) получим

$$x_1(t) = A_1 \cos \omega t = A_1 \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} = x_1'(t) + x_1''(t) \quad (3)$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \psi) = A_2 \frac{e^{j(\omega t + \psi)} + e^{-j(\omega t + \psi)}}{2} = x_2'(t) + x_2''(t), \quad (4)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ .

Представим в выражениях (3), (4) такую тригонометрическую функцию в символической форме записи:

$$\cos \omega t = e^{j\omega t}, \quad \cos(\omega t + \psi) = e^{j(\omega t + \psi)}.$$

В [1] показано, что такое упрощение не влияет на конечный результат в силу линейности системы. В результате получим:

$$x_1(t) = A_1 \cos \omega t = A_1 e^{j\omega t}, \quad (5)$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \psi) = A_2 e^{j(\omega t + \psi)}. \quad (6)$$

В случае если динамика звена описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$c_0 x_2'' + c_1 x_2' + c_0 x_2 = b_0 x_1' + b_1 x_1 \quad (7)$$

то, определив производные от функций (5), (6) и подставив их значения в выражение (7), получим:

$$\begin{aligned} c_0 (\omega t)^2 A_2 e^{j(\omega t + \psi)} + c_1 \omega t A_2 e^{j(\omega t + \psi)} + c_2 A_2 e^{j(\omega t + \psi)} = \\ = b_0 A_1 \omega t e^{j(\omega t + \psi)} + b_1 A_1 e^{j(\omega t + \psi)}, \end{aligned}$$

После сокращения на общий множитель  $e^{j\omega t}$  и приведения подобных членов имеем:

$$\frac{A_2}{A_1} e^{j\psi} = \frac{b_0 j\omega + b_1}{c_0 s(j\omega)^2 + c_1 j\omega + c_2} = W(j\omega), \quad (8)$$

где  $W(j\omega)$  – частотная передаточная функция.

Полученное выражение является функцией комплексной переменной, которую в показательной форме записи [2] можно представить как

$$W(j\omega) = |W(j\omega)| e^{j \arg W(j\omega)}.$$

Из последнего уравнения видно, что соотношение между амплитудами сигналов будет определяться модулем функции  $W(j\omega)$ , а разность фаз ее аргументом:

$$A(\omega) = \frac{A_2}{A_1} = |W(j\omega)|; \quad (9)$$

$$\psi(\omega) = \arg W(j\omega). \quad (10)$$

Здесь  $A(\omega)$  – амплитудная частотная характеристика (АЧХ);

$\psi(\omega)$  – фазовая частотная характеристика (ФЧХ).

В работе [3] приведенные результаты обобщаются для систем с дифференциальным уравнением произвольного порядка:

$$c_0 p^n x_2 + c_1 p^{n-1} x_2 + \dots + c_n x_2 = b_0 p^m x_1 + b_1 p^{m-1} x_1 + \dots + b_m x_1, \quad (11)$$

где  $p$  – символ (оператор) дифференцирования. В итоге получается выражение, аналогичное (8), которое имеет вид:

$$\frac{A_2}{A_1} e^{j\psi} = W(j\omega) = \frac{b_0 (j\omega)^m + b_1 (j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{c_0 (j\omega)^n + c_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + c_n},$$

что также позволяет найти уравнения для АЧХ и ФЧХ.

*Предлагаемое решение*

Выражения для частотных характеристик (9) и (10) получены в [1, 3] решением соответствующего частного неоднородного уравнения (7) или (11), которое описывает установившееся движение системы при входном гармоническом воздействии (1).

В данной работе предлагается определить такие частотные характеристики, основываясь на анализе передаточной функции  $W(s)$  системы с использованием преобразования Лапласа [1], где  $s$  – комплексная переменная преобразования Лапласа. Для этого найдем структурную схему системы, которая в соответствии с рисунком 1 будет иметь вид, приведенный на рисунке 2.

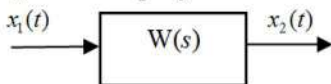


Рисунок 2 – Структурная схема системы

Здесь  $X_1(s) = L[x_1(t)]$ ,  $X_2(s) = L[x_2(t)]$  – изображения входного и выходного сигналов соответственно, где  $L$  – символ прямого преобразования Лапласа. Тогда на основании рисунка 2 зависимость между изображениями этих сигналов будет иметь вид:

$$X_2(s) = X_1(s)W(s).$$

В этом случае для системы, описываемой дифференциальным уравнением (11) передаточная функция будет следующей:

$$W(s) = \frac{X_2(s)}{X_1(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m}{c_0s^n + c_1s^{n-1} + \dots + c_m}$$

Найдем изображения сигналов  $X_1(s), X_2(s)$ , если оригиналы  $x_1(t), x_2(t)$  описываются выражениями (3), (4). В этом случае

$$X_1(s) = L \left[ A_1 \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \right],$$

$$X_2(s) = L \left[ A_1 \frac{e^{j(\omega t + \psi)} + e^{-j(\omega t + \psi)}}{2} \right],$$

Представим эти изображения в виде двух составляющих. Тогда в соответствии со свойством линейности [1] получим:

$$\left. \begin{aligned} X_1(s) = X'_1(s) = X''_1(s) &= L \left[ A_1 \frac{e^{j\omega t}}{2} \right] + L \left[ A_1 \frac{e^{-j\omega t}}{2} \right], \\ X_2(s) = X'_2(s) = X''_2(s) &= L \left[ A_2 \frac{e^{j(\omega t + \psi)}}{2} \right] + L \left[ A_2 \frac{e^{-j(\omega t + \psi)}}{2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В линейной системе на основании принципа суперпозиции можно рассматривать отдельно взаимодействие двух составляющих изображений сигналов

$$X_1(s) = X'_1(s) + X''_1(s),$$

$$X_2(s) = X'_2(s) + X''_2(s),$$

где

$$X'_2(s) = X'_1(s)W(s), \quad (13)$$

$$X''_2(s) = X''_1(s)W(s). \quad (14)$$

Найдем связь между изображениями только для формулы (13). Для выражения (14) результат будет аналогичный.

Подставляя значения  $x'_1(t), x'_2(t)$  из (3, 4) в (13), получим

$$L \left[ A_2 \frac{e^{j(\omega t + \psi)}}{2} \right] = L \left[ A_1 \frac{e^{j\omega t}}{2} \right] W(s).$$

Согласно свойству линейности будем иметь

$$A_2 e^{j\psi} L \left[ \frac{e^{j\omega t}}{2} \right] = A_1 L \left[ \frac{e^{j\omega t}}{2} \right] W(s).$$

Сокращая подобные члены и представляя передаточную функцию  $W(s)$  в показательной форме, получим

$$A_2 e^{j\psi} = A_1 |W(s)| e^{j \arg W(s)}$$

Положив  $s = j\omega$ , найдем выражения для определения АЧХ и ЛЧХ системы:

$$A(\omega) = \frac{A_2}{A_1} = |W(j\omega)|,$$

$$\psi(\omega) = \arg W(j\omega).$$

Сравнив последние два уравнения с формулами (9) и (10), полученными в работах [1, 3], можно сделать вывод, что эти результаты идентичны. Таким образом, предложенный подход позволяет находить частотные характеристики систем и отдельных их звеньев на основе передаточных функций. Рассмотренный подход к

определению этих характеристик является более эффективным, так как передаточные функции широко используются при цифровой обработке сигналов, для описания объектов в автоматике, электротехнике, связи и т.д. Кроме того именно передаточные функции используются для построения частотных характеристик в программной среде MATLAB.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – М.: Наука, 2003. – 567 с.
2. Половинкин Е.С. Теория функции комплексного переменного. – М.: Инфра-М, 2024. – 253 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Линейные системы. – М.: Физматлит, 2016. – 312 с.

УДК 621.396.96

### ЦВЕТКОВ А.Ю.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### РАЗРАБОТКА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*В статье рассматриваются принципы построения инерциальной навигационной системы (ИНС), ее ключевые компоненты и алгоритмы обработки данных. Особое внимание уделяется методам компенсации ошибок, интеграции с другими навигационными системами и перспективам развития технологий. Представлены результаты моделирования работы ИНС в различных условиях, включая экспериментальные данные, полученные с использованием отечественных датчиков.*

Инерциальная навигационная система (ИНС) - это автономная система, которая определяет местоположение, ориентацию и скорость объекта без использования внешних сигналов, таких как GPS или радиомаяки. Он основан исключительно на измерении сил инерции (ускорений и угловых скоростей), действующих на объект, а затем обрабатывает их для расчета параметров движения. Этот принцип, несмотря на кажущуюся простоту, лежит в основе самых сложных навигационных решений, используемых в авиации, космосе, навигации, робототехнике и многих других областях.

Основные задачи инерциальной навигационной системы:

- Определение положения объекта-вычисление координат (широты, долготы, высоты) на основе измеренных ускорений.

- Вычисление скорости- интегрирование ускорений для получения вектора скорости.
- Ориентация в пространстве-определение углов крена, тангажа и рыскания с помощью гироскопов.
- Автономная работа - функционирование без внешних сигналов (GPS, ГЛОНАСС).
- Исправление ошибок - минимизация накопления ошибок с помощью алгоритмов фильтрации (например, фильтра Калмана).

Принцип действия ИНС основан на двух основных компонентах: гироскопах и акселерометрах.

Акселерометры измеряют линейные ускорения объекта в трех ортогональных направлениях. Акселерометр - это датчик, который реагирует на силу инерции, возникающую при ускорении объекта. Существуют различные типы акселерометров, включая механические, пьезоэлектрические, емкостные и МЭМС-акселерометры. Результаты измерения акселерометром представляют собой проекции кажущегося ускорения (включая ускорение силы тяжести) на ось чувствительности датчика.

Гироскопы измеряют угловые скорости вращения объекта вокруг трех ортогональных осей. Гироскоп - это датчик, который сохраняет свою ориентацию в пространстве благодаря закону сохранения углового момента. Существуют различные типы гироскопов, включая механические гироскопы, лазерные гироскопы (кольцевые лазерные гироскопы - РЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), а также гироскопы МЭМС. Результаты измерений гироскопов представляют собой проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности датчика.

Информация, получаемая от акселерометров и гироскопов, обрабатывается специальным вычислительным блоком (инерциальным навигационным компьютером) с использованием сложных математических алгоритмов. Этот блок выполняет следующие основные функции:

- Преобразование координат: переключение с системы координат, связанной с ИНС, на геодезическую или другую удобную для пользователя систему координат.
- Интегрирование ускорений и угловых скоростей: линейные скорости и угловые перемещения объекта вычисляются на основе измеренных ускорений и угловых скоростей.
- Расчет местоположения: интегрируя линейные скорости, вычисляется текущее местоположение объекта.

- Определение ориентации: на основе угловых перемещений вычисляется ориентация объекта в пространстве (углы крена, тангажа и рыскания).

- Исправления ошибок: Во время работы ИНС ошибки накапливаются из-за ошибок датчиков, вычислительных ошибок и других факторов. Алгоритмы исправления ошибок сводят к минимуму влияние этих ошибок на точность навигации.

В зависимости от конструкции и принципа действия существует несколько основных типов ИНС:

- Платформенные ИНС (ПИНС): в этих системах акселерометры и гироскопы установлены на стабилизированной платформе, которая поддерживается в заданном положении в инерциальном пространстве сервоприводами. Защелки обеспечивают высокую точность, но сложны и дороги в изготовлении. В российской практике они активно использовались в системах стратегического наведения, где требовалась максимальная точность.

- Бесплатформенные ИНС (БИНС): в этих системах акселерометры и гироскопы жестко прикреплены к корпусу объекта. Ориентация объекта в пространстве определяется математической обработкой данных датчиков. БИНС более компактны, легки и дешевы, чем ПИНС, но менее точны. Бесплатформенные системы получили широкое распространение благодаря развитию микроэлектроники и компьютерных технологий.

- ИНС на основе технологий МЭМС: Эти системы используют микроэлектромеханические датчики (МЭМС) для измерения ускорений и угловых скоростей. Модули МЭМС имеют небольшие размеры, вес, энергопотребление и стоимость, что делает их подходящими для широкого спектра применений. Однако они менее точны, чем ПИНС и БИНС на основе традиционных гироскопов и акселерометров.

- Гибридные навигационные системы: Они сочетают ИНС с другими навигационными системами, такими как GPS, ГЛОНАСС, радиомаяки, одометры и барометрические высотомеры. Объединение различных источников информации повышает точность, надежность и стабильность навигации в различных средах. Примером может служить интеграция ИНС и GPS для обеспечения непрерывной навигации в условиях плохой спутниковой видимости (например, в туннелях или городских зданиях).

#### *Преимущества ИНС*

- Автономность: не требует внешних сигналов или инфраструктуры, что делает его устойчивым к помехам и перебоям в

работе. Это особенно важно в ситуациях, когда использование GPS или других спутниковых систем невозможно или желательно (например, при военных действиях под водой или в космосе).

- Высокая динамика: способна отслеживать быстрые и сложные перемещения объектов. ИНС может эффективно работать в условиях высоких ускорений и угловых скоростей, что делает его незаменимым в авиационной и ракетной технике.

- Высокая точность в краткосрочной перспективе: в течение короткого периода времени ИНС может обеспечить высокую точность определения местоположения и ориентации.

#### *Недостатки ИНС*

- Накопление ошибок: во время работы ИНС ошибки накапливаются из-за ошибок датчиков, вычислительных ошибок и других факторов. Эти ошибки со временем приводят к постепенному ухудшению точности навигации.

- Требуется начальная инициализация: ИНС требует начальной инициализации, которая включает определение начального местоположения, ориентации и скорости объекта. Точность начальной инициализации влияет на точность навигации в течение всего периода эксплуатации.

- Высокая стоимость (для высокоточных систем): высокоточные ИНС, использующие прецизионные гироскопы и акселерометры, могут быть довольно дорогими.

ИНС широко используются в различных областях, в том числе:

- Авиация и космонавтика: навигация самолетов, вертолетов, ракет, космических кораблей и спутников. ИНС используются для автоматического управления полетом, определения местоположения и ориентации, а также обеспечения безопасности полета. Российские космические корабли "Союз" и "Прогресс" активно используют ИНС для навигации и ориентирования в космосе.

- Судходство: навигация морских и речных судов, подводных лодок и автономных подводных аппаратов. ИНС используются для определения местоположения, курса и скорости судна, а также для автоматического управления движением.

- Военная техника: нацеливание ракет, торпед, артиллерийских снарядов, беспилотных летательных аппаратов и другой военной техники. ИНС обеспечивают высокую точность и надежность наведения в условиях помех и противодействия противника.

- Робототехника: навигация мобильных роботов, автономных транспортных средств и промышленных роботов. ИНС позволяют



роботам ориентироваться в пространстве и выполнять задачи без вмешательства человека.

- **Геодезия и картография:** определение координат и высот точек на поверхности Земли. ИНС используются для создания высокоточных карт и моделей местности.

- **Автомобильная промышленность:** системы автомобильной навигации, автономного вождения и помощи водителю. ИНС позволяют транспортным средствам определять свое местоположение и ориентацию в условиях плохой видимости со спутника (например, в туннелях или в городских районах).

- **Персональная навигация:** смартфоны, планшеты, трекеры, фитнес-трекеры и другие мобильные устройства. МЭМС-ИНС используются для определения ориентации устройства, подсчета шагов, навигации в помещении и других приложений.

В настоящее время ИНС развивается по нескольким основным направлениям:

- **Миниатюризация и снижение затрат:** дальнейшее развитие технологий MEMS позволяет создавать все более компактные, легкие и дешевые ИНС.

- **Повышенная точность:** для повышения точности ИНС разрабатываются новые алгоритмы обработки данных и исправления ошибок. Мы изучаем возможности использования квантовых гироскопов и акселерометров, которые могут обеспечить значительно более высокую точность.

- **Интеграция с другими системами:** ИНС все чаще интегрируются с другими навигационными системами, такими как GPS, ГЛОНАСС, радиомаяки, одометры и барометрические высотомеры. Объединение различных источников информации повышает точность, надежность и стабильность навигации в различных средах. Также активно развивается интеграция с системами машинного зрения и SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), что позволяет создавать автономные системы, способные ориентироваться и строить карты окружающей среды.

- **Разработка алгоритмов обработки данных:** алгоритмы фильтрации. В настоящее время совершенствуются алгоритмы фильтрации Калмана и другие методы для эффективного объединения данных от различных датчиков и минимизации влияния шума и ошибок. Методы машинного обучения активно используются для адаптации алгоритмов к конкретным условиям эксплуатации и повышения точности навигации.

- Применение в новых областях: ИНС используются в новых областях, таких как виртуальная и дополненная реальность, спорт, медицина и мониторинг окружающей среды.

В заключение отметим, что инерциальная навигационная система является мощным и универсальным инструментом, который позволяет определять местоположение, ориентацию и скорость объекта без использования внешних сигналов. Несмотря на некоторые недостатки, ИНС остается незаменимым в тех случаях, когда требуются автономность, высокая динамика и надежная навигация. Дальнейшее развитие технологий и алгоритмов обработки данных расширит сферу применения приложений ИНС и сделает их еще более точными, компактными и доступными.

#### *Экспериментальные исследования*

Первый эксперимент. В экспериментальном методе для оценки точности ИНС были проведены тесты на мобильной платформе с использованием: гироскопа MEMS-GS-1 (российского производства, точность 0,5°/с), акселерометра ADXL355 (аналог отечественного производства), микроконтроллера STM32H7 для обработки данных и GPS-приемника ГЛОНАСС/KPI для коррекции.

Этапы эксперимента включали в себя калибровку датчиков, запись данных в автономном режиме (только ИНС), запись данных в режиме коррекции (ИНС + GPS) и сравнение с эталонной траекторией (оптическая система Vicon).

В результате получены следующие результаты.

- Автономный режим (только ИНС): ошибка позиционирования: ~1,5 м за 5 минут; накопление угловой ошибки: ~3° за 10 минут.

- Гибридный режим (ИНС + GPS): погрешность определения местоположения снижается до 0,3м; угловая погрешность компенсируется магнитометром.

- Применение фильтра Калмана: уменьшение количества ошибок при ускорении на 40%.

Таким образом российские датчики МЭМС обеспечивают достаточную точность для краткосрочной навигации. Интеграция с ГЛОНАСС значительно повышает надежность системы. Фильтр ФильтрКалмана эффективно компенсирует дрейф гироскопа.

Второй эксперимент. В экспериментальном методе для оценки точности ИНС были проведены тесты на мобильной платформе с использованием: гироскопа Bosch BMI088 (зарубежный аналог, точность 0,3°/с), акселерометра MPU-6050 (точность 0,01 g), микроконтроллера RaspberryPi RP2040 (133 МГц, поддержка

Python/C++) и GPS-приемника u-blox NEO-M8 (точность позиционирования 0,1-0,5 м).

Алгоритм коррекции: Дополнительный фильтр + нейронная сетевая модель (вместо фильтра Калмана).

Этапы эксперимента включали в себя калибровку датчиков, автономный режим (только для ИНС), гибридный режим (ИНС + GPS) и сравнение с системой Visop.

В результате получены следующие результаты.

- Автономный режим (только ИНС): ошибка позиционирования – 1,2 м за 5 минут вследствие уменьшения дрейфа гироскопа BoschBMI088 (0,3 °/с) и высокой точности акселерометра MPU-6050 (0,01 g); угловая ошибка – накопление 1,8° за 10 минут (для частичной компенсации используется дополнительный фильтр).

- Гибридный режим (ИНС + GPS): ошибка определения местоположения уменьшена до 0,15 м благодаря GPS u-blox NEO-M8 (точность 0,1–0,5 м); Частота GPS data update rate: 5 Гц; угловая ошибка с 0,5° (компенсируется нейронной сетевой моделью, обученной на данных дрейфа).

- Модель нейронной сети и дополнительный фильтр: погрешность в скорости уменьшена на 55% (с 0,18 м/с до 0,08 м/с); стабильность курса улучшена на 20% по сравнению с фильтром Калмана.

Таблица 1 – Сравнение результатов двух разных экспериментов

Параметр	Первый эксперимент	Второй эксперимент
Автономный режим:		
Ошибка позиционирования	1,5 м за 5 мин	1,2 м за 5 мин
Накопление угловой ошибки	3 ° за 10 мин	1,8 ° за 10 мин
Гибридный режим:		
Ошибка позиционирования	0,3 м	0,15 м
Угловая ошибка	Компенсируется магнитометром	0,5 °
Эффективность фильтра:		
Снижение ошибки скорости	40%	55%
Стабильность обменного курса	улучшена	Выше на 20%

Проведен анализ различий

- Аппаратная часть: зарубежные датчики (BMI088, MPU-6050) показали меньший дрейф из-за повышенной точности.

- GPS u-blox NEO-M8 обеспечивает более точную коррекцию за счет поддержки многочастотного приема.

- Программные алгоритмы: модель нейронной сети (обученная на данных дрейфа) превзошла фильтр Калмана по снижению ошибки скорости, но требует больше вычислительных ресурсов. Дополнительный фильтр был менее эффективен при коррекции угла наклона, чем оригинальный магнитометр.

- Микроконтроллер: STM32H7 (первый эксперимент) лучше оптимизирован для работы в режиме реального времени, в то время как RP2040 проигрывает в скорости обработки данных.

В результате эксперимента можно сделать следующие выводы:

- Точность датчика: зарубежные МЭМС-датчики снизили накопление ошибок на 25-40%, но российские аналоги остаются экономически выгодными для базовых задач.

- Роль GPS: модули с поддержкой ГЛОНАСС (первый эксперимент) и u-blox (второй эксперимент) имеют решающее значение для гибридного режима, но u-blox показал лучшую точность.

- Алгоритмы: фильтр Калмана проще реализовать, но методы нейронных сетей могут адаптироваться к нелинейным ошибкам.

Для долговременной навигации целесообразно использовать гибридные системы с GPS/ГЛОНАСС и нейронными сетевыми алгоритмами. Российские датчики подходят для краткосрочных задач, но требуют более частой калибровки.

Подводя итог следует отметить, что инерциальная навигационная система является мощным и универсальным инструментом, который позволяет определять местоположение, ориентацию и скорость объекта без использования внешних сигналов. Несмотря на некоторые недостатки, ИНС остается незаменимым в тех случаях, когда требуются автономность, высокая динамика и надежная навигация. Дальнейшее развитие технологий и алгоритмов обработки данных расширит сферу применения приложений ИНС и сделает их еще более точными, компактными и доступными. Российские разработки ИНС продолжают вносить значительный вклад в развитие этой важной технологии.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Titterton D., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology. – IET, 2004. – 558 с.

2. Слив Э.И. Прикладная теория инерциальной навигации : учебное пособие / Э.И. Слив. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2002. — 132 с.

3. Мэйбек П.С. Стохастические модели, оценка и контроль. – AcademicPress, 1979.

4. Шатилов А.Ю. Разработка методов и алгоритмов оптимальной обработки сигналов и информации в инерциально-спутниковых системах навигации. [Электронный ресурс] – URL: <https://srns.ru/images/c/cf/Autoref.pdf> (дата обращения 02.03.2025).

УДК 004.896

**ЧАПЛЬГИН В.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

*Рассмотрены принципы построения испытательного оборудования, позволяющего проводить комплексные исследования поведения материалов при динамических нагрузках. Предложена оригинальная конструкция стенда, сочетающая механический и электромеханический принципы нагружения, что обеспечивает широкий диапазон энергий удара (5-1000 Дж) и высокую точность измерений.*

Современные требования к надежности и безопасности технических систем обуславливают необходимость совершенствования методов оценки прочностных характеристик материалов и конструкций. Особое значение приобретают исследования поведения материалов при динамических нагрузках, которые наиболее точно моделируют реальные условия эксплуатации в различных отраслях промышленности. Ударные испытания представляют собой важнейший инструмент для изучения механических свойств материалов при высокоскоростном нагружении, позволяя оценить такие критические параметры, как ударная вязкость, сопротивление хрупкому разрушению и способность поглощать энергию.

Актуальность разработки новых конструкций испытательных стендов обусловлена появлением современных материалов с особыми свойствами - металлических стекол, наноструктурированных сплавов, полимерных композитов и керамики. Традиционные испытательные установки часто не могут обеспечить необходимый диапазон нагрузок и точность измерений, требуемых для комплексной оценки этих

материалов. Кроме того, развитие цифровых технологий обработки данных и компьютерного моделирования создает предпосылки для создания принципиально новых испытательных комплексов, интегрирующих современные средства измерений и системы автоматизированного управления.

Современные стенды ударных испытаний можно классифицировать по нескольким ключевым признакам. Наиболее распространенными остаются маятниковые установки, принцип действия которых основан на преобразовании потенциальной энергии в кинетическую. К их преимуществам следует отнести относительную простоту конструкции и возможность проведения испытаний по стандартным методикам. Однако такие установки обладают существенными ограничениями по максимальной энергии удара и точности измерения параметров деформации.

Более совершенными являются гидропневматические системы, позволяющие создавать контролируемые ударные воздействия с широким диапазоном энергий. Их главным недостатком остается сложность конструкции и необходимость использования дополнительного оборудования для генерации рабочего давления. Наиболее перспективными представляются электромеханические установки с линейными приводами, обеспечивающие высокую точность управления параметрами удара и возможность программирования сложных режимов нагружения.

Предлагаемая конструкция испытательного стенда основана на комбинированном принципе действия, сочетающем преимущества механических и электромеханических систем. Основу конструкции составляет массивная стальная рама, обеспечивающая необходимую жесткость и виброустойчивость. Ударный модуль включает в себя направляющие рельсы с минимальным коэффициентом трения, систему точного позиционирования и электромагнитный привод, позволяющий регулировать начальную скорость ударника в диапазоне от 1 до 20 м/с.

Особенностью разрабатываемого стенда является модульная конструкция ударного узла, позволяющая оперативно изменять массу ударника от 5 до 50 кг, что в сочетании с регулируемой высотой падения обеспечивает диапазон энергий удара от 5 до 1000 Дж. Для крепления образцов предусмотрена универсальная система зажимов с возможностью изменения угла наклона от 0 до 90 градусов, что особенно важно при испытании анизотропных материалов.

Современные требования к точности измерений при ударных испытаниях обусловили необходимость разработки комплексной

измерительной системы. В состав измерительного комплекса входят: тензометрический датчик силы с диапазоном измерения до 100 кН и погрешностью не более 0,5%, высокоточный акселерометр с частотой дискретизации 1 МГц, лазерный виброметр для бесконтактного измерения скорости деформации и высокоскоростная видеокамера с частотой съемки до 100 000 кадров в секунду.

Особое внимание уделено системе сбора и обработки данных, построенной на базе промышленного компьютера с специализированным программным обеспечением. Разработанные алгоритмы позволяют в реальном времени анализировать полученные данные, строить кривые "напряжение-деформация" и автоматически рассчитывать основные механические характеристики испытываемого материала.

Экспериментальные исследования проводились на различных типах материалов, включая конструкционные стали, алюминиевые сплавы и полимерные композиты. Полученные результаты демонстрируют высокую повторяемость испытаний с отклонением не более 2% для металлических образцов и 5% для композитных материалов. Особый интерес представляют данные по анизотропии ударной вязкости композитов, показывающие существенную зависимость этого параметра от ориентации волокон относительно направления удара.

Сравнительный анализ результатов, полученных на разработанном стенде и традиционных установках, показывает существенное преимущество новой конструкции в части точности измерения энергии поглощения и возможности регистрации полной диаграммы деформирования. Это особенно важно при исследовании новых материалов с нелинейной характеристикой деформационного упрочнения.

Разработанная конструкция стенда ударных испытаний представляет собой современный испытательный комплекс, сочетающий широкий диапазон энергий удара с высокой точностью измерений. Модульный принцип построения позволяет адаптировать установку для решения различных исследовательских задач, а применение современных средств измерений обеспечивает получение достоверных данных о поведении материалов при динамическом нагружении.

Перспективы дальнейшего развития связаны с внедрением систем искусственного интеллекта для автоматического анализа результатов испытаний, разработкой методов испытаний при экстремальных температурах и созданием универсальных

математических моделей для прогнозирования поведения материалов при ударном нагружении на основе ограниченного числа экспериментов.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. ГОСТ Р ИСО 148-1-2016 "Металлы. Метод испытания на ударный изгиб". – М.: Стандартиформ, 2016. – 32 с.
2. Антипов В.В. Современные методы испытаний конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 2020. – 456 с.
3. Джонс Н. Динамика конструкций при ударном нагружении. – М.: Мир, 2005. – 512 с.
4. Петров Ю.В. Ударные испытания и динамическая прочность материалов. – СПб.: Политехника, 2018. – 328 с.
5. Баженов В.А. Компьютерное моделирование ударных процессов. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 284 с.

УДК 621.384

**ЧЕЛЯНОВ Р.Д.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### **РОЛЬ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ В АППАРАТУРЕ ДЛЯ РАЗВЕДКИ ГОРНЫХ ПОРОД**

*В статье рассматривается роль генератора импульсов тактовой частоты для разведки горных пород методом вызванной поляризации.*

Метод вызванной поляризации (ВП) — это передовой и универсальный геофизический инструмент, обладающий широким спектром применения в разнообразных областях геологии и геофизических исследований. Этот метод является надежным и проверенным способом для обнаружения и оценки залежей рудных полезных ископаемых, что делает его незаменимым в горнодобывающей промышленности. Кроме того, метод ВП эффективно используется в гидрогеологии для изучения подземных вод и в инженерной геологии для оценки стабильности грунтов и пород. Важно отметить, что обнаружение минералов в земных недрах и определение их характеристик — это лишь небольшая часть задач, которые успешно решаются с помощью метода вызванной поляризации. Спектр применения метода ВП гораздо шире и охватывает решение разнообразных геологических задач.



Глубокое понимание физических характеристик горных пород, а также понимание их поведения при воздействии электрического поля, является основой успешного применения метода ВП. Одним из ключевых принципов работы этого метода является создание искусственного электрического поля в земле. Это электрическое поле, взаимодействуя с горными породами, приводит к поляризации и движению ионов, присутствующих в порах и трещинах пород. Данное явление, лежащее в основе метода ВП, может быть точно описано с использованием уравнений электродинамики. Эти уравнения устанавливают прямую связь между плотностью электрического тока, протекающего через породу, и фундаментальными параметрами этой породы, такими как её электропроводность и напряженность электрического поля, созданного в ней. Таким образом, применение уравнений электродинамики позволяет количественно оценить и интерпретировать процессы, происходящие в горных породах под воздействием электрического поля, что необходимо для эффективного использования метода ВП. Формула, описывающая плотность тока, имеет следующий вид:  $J = \sigma E$ , где  $J$  — плотность тока в амперах на квадратный метр ( $A/m^2$ ),  $\sigma$  — электропроводность в сименсах на метр ( $Cm/m$ ), а  $E$  — напряженность электрического поля, измеряемого в вольтах на метр ( $V/m$ ). Это уравнение показывает, что более высокая электропроводность материалов способствует более эффективному прохождению электрического тока. Надо отметить, что данная концепция играет ключевую роль в методе вызванной поляризации, так как именно через изучение электрических свойств пород исследуется наличие и концентрация полезных ископаемых.

Когда электрический ток проходит через породу, происходит внутривидовое взаимодействие с заряженными частицами, приводящее к возникновению двойного электрического слоя. Этот слой, сформированный на границах между различными проводниками, создает определенные условия для электрической поляризации. Более того, поляризуемость породы может быть выражена через разность потенциалов и плотность тока:  $P = V/J$ , где  $P$  — поляризуемость в фарадах на метр ( $F/m$ ),  $V$  — разность потенциалов в вольтах ( $V$ ), а  $J$  — плотность тока ( $A/m^2$ ). Понимание поляризуемости и ее количественные характеристики помогают исследователям сделать выводы о характеристиках горных пород и потенциальных залежах полезных ископаемых.

Особенностью метода ВП является также то, что когда электрический ток прекращается, электрический потенциал начинает затухать. Это затухание создает обратный ток, который фиксируется в

процессе. Импульсный сигнал, возникающий в результате этого процесса, содержит ценную информацию о минералогической структуре и электрических свойствах горной породы. Чтобы качественно получить и проанализировать эти сигналы, исследователям необходимо точно устанавливать временные параметры, форму и длительность возбуждающего импульса. Это особенно важно, так как неточности в этих параметрах могут привести к серьезным искажениям готовых результатов, что создает большое количество вызовов для геофизиков.

Основным элементом, которое отвечает за создание и управление электрическими импульсами, является генератор импульсов тактовой частоты (ГИТЧ). Этот компонент аппаратуры осуществляет множество функций, таких как создание последовательностей электрических импульсов с заданными параметрами – формой, амплитудой и длительностью. Наличие таких возможностей позволяет адаптировать возбуждающий сигнал к специфическим требованиям исследования и физико-химическим свойствам анализируемой породы.

Важной особенностью ГИТЧ является то, что расположение формы импульса влияет на результаты исследований. Прямоугольные импульсы, например, используются для изучения быстропротекающих электрохимических реакций, а синусоидальные или треугольные формы подходят для анализа частотных зависимостей. Это показывает, что знания о поведении различных материалов могут существенно повлиять на правильный выбор параметров сигнала для максимальной эффективности исследования.

Генератор также управляет временной структурой возбуждающего сигнала, устанавливая интервалы между импульсами, продолжительность пауз и чередование полярности. Эти параметры позволяют реализовывать разные протоколы измерений, достаточно гибкие и адаптированные к своим собственным рабочим условиям. Формула, которая используется для расчета общей продолжительности одного цикла, выглядит следующим образом:  $T_{total} = T_{on} + T_{off}$ , где  $T_{total}$  — общая продолжительность цикла,  $T_{on}$  — время, в течение которого ток подается, а  $T_{off}$  — время, когда подача тока прекращается. Эта формула подчеркивает необходимость обеспечения высокой точности во временных параметрах, так как даже небольшие ошибки могут повлиять на результаты исследования.

Современные генераторы на основе цифровых сигнальных процессоров (DSP) и программируемых логических интегральных схем (FPGA) предлагают еще больше возможностей. Они

обеспечивают большую стабильность, точность и гибкость управления, позволяя проводить исследования не только в стандартных режимах, но и управлять сигналами с изменяющимися частотами. Это особенно ценно, так как оценка частотной зависимости поляризуемости становится одним из значимых направлений современных геофизических исследований.

Частотная зависимость поляризуемости может быть выражена через уравнение:  $R(f) = P(f) / J(f)$ , где  $R(f)$  — частотное сопротивление,  $P(f)$  — поляризуемость на частоте  $f$ , а  $J(f)$  — плотность тока на этой же частоте. Это уравнение показывает, как поляризуемость изменяется в зависимости от частоты приложения электрического воздействия. Это представление позволяет глубже понять и проанализировать структуры и состав исследуемых пород, а также оценить их проводимость на различных диапазонах частот.

Сравнение генераторов импульсов тактовой частоты (таблица 1) демонстрирует основные характеристики различных типов генераторов, такие как гибкость, стабильность частоты, диапазон частот, потребляемая мощность, уровень фазового шума, возможности управления и устойчивость к вибрациям. Данное сравнение позволяет оценить преимущества и ограничения каждого типа генератора применительно к задачам геофизической разведки.

Таблица 1 – Основные характеристики различных типов генераторов

Характеристика	Генератор на основе Б5Р (Цифровой сигнальный процессор)	Генератор на основе РРСА (Программируемая логическая интегральная схема)	Кварцевый генератор (ХО, ТСХО, ОСХО)	Генератор на LC контуре
Гибкость	Высокая (программная перенастройка)	Очень высокая (аппаратная перенастройка)	Низкая (фиксированная частота)	Средняя (требует подстройки)
Стабильность частоты	Средняя (зависит от качества ЦАП и АЦП)	Высокая (зависит от качества используемых компонентов)	Очень высокая (особенно ОСХО)	Низкая (чувствителен к внешним факторам)
Диапазон частот	Широкий (ограничен возможностями и Б5Р)	Широкий (ограничен возможностями и РРСА)	Ограничен (выбирается при изготовлении)	Широкий (зависит от компонентов)

Потребляемая мощность	Средняя	Высокая (зависит от сложности логики)	Низкая (особенно ХО и ТСХО)	Низкая
Фазовый шум	Зависит от качества ЦАП/АЦП и алгоритма	Зависит от качества компонентов и дизайна	Низкий (особенно ОСХО)	Высокий
Управляемость	Высокая (программное управление)	Высокая (аппаратное и программное управление)	Низкая (только включение/выключение)	Средняя (аналоговая подстройка)
Виброустойчивость	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая

Выбор генератора импульсов также требует внимания к характеру проводимого исследования. Важно учитывать как цели, так и специфические условия, при которых будет проводиться исследование. Учитывая высокую стабильность и точность, современные модели генераторов предлагают гибкие решения, которые удачно сочетаются с необходимыми параметрами для разнообразных исследований. Эти новые генераторы могут работать в различных режимах и обеспечивать более детальную информацию о физическом состоянии исследуемого объекта.

Влияние температуры на стабильность частоты генераторов импульсов тактовой частоты (таблица 2) анализирует влияние температурных изменений, как одного из значимых факторов внешней среды, на стабильность частоты различных типов генераторов. В таблице также представлены распространенные методы компенсации температурного дрейфа и соответствующие рекомендации по применению в геофизических исследованиях.

Таблица 2 – Влияние температуры на стабильность частоты генераторов импульсов тактовой частоты

Тип генератора	Влияние температуры	Компенсация температурного дрейфа	Применение в геофизике
ЭЗР-генератор	Умеренное (зависит от стабильности опорного генератора)	Цифровая компенсация (алгоритмическая)	Обработка сигналов, телеметрия
PPSA-генератор	Умеренное (зависит от стабильности опорного генератора)	Аппаратная и цифровая компенсация	Управление датчиками, сбор данных, синхронизация

ХО (Кварцевый)	Значительное (без температурной компенсации)	Отсутствует (базовый генератор)	Не подходит для высокоточных измерений
ТСХО (Температурно-компенсированный кварцевый генератор)	Небольшое (компенсирование в определенном диапазоне)	Термисторная сеть, цифровая компенсация	Портативная аппаратура, полевые измерения
ОСХО (Кварцевый генератор с термостатом)	Минимальное (поддержание постоянной температуры кристалла)	Термостатирование кристалла	Высокоточные измерения, эталонные частоты
Генератор на LC контуре	Сильное (зависит от температурной стабильности)	Термокомпенсация (трудно реализовать эффективно)	Устаревшие системы, не рекомендуется

Сравнение стоимости и доступности различных типов генераторов (таблица 3) нужно для оценки экономической целесообразности использования в конкретных проектах. Таблица содержит информацию о ценовых характеристиках и доступности различных типов генераторов, что необходимо для объективной оценки экономической целесообразности их применения в конкретных проектах. Принимая во внимание бюджетные ограничения и требования к производительности разрабатываемой аппаратуры, рациональный выбор генератора способен оказать существенное влияние на успешность геофизических исследований.

Таблица 3 – Сравнение стоимости и доступности различных типов генераторов

Тип генератора	Стоимость	Доступность
БЗР-генератор	Средняя	Высокая (доступны различные DSP)
PPCA-генератор	Выше средней	Высокая (доступны различные FPGA)
ХО (Кварцевый)	Низкая	Очень высокая (массовое производство)
ТСХО	Средняя	Высокая (широкий выбор производителей)
ОСХО	Высокая	Ограниченная (специализированные производители)
Генератор на LC контуре	Низкая (компоненты)	Высокая (компоненты легко доступны)

Не менее важной является и обратная связь в системах, использующих метод вызванной поляризации. Постоянный контроль

состояния генератора и всей системы измерений помогает исследователям в раннем обнаружении и разрешении проблем, что значительно увеличивает надежность аппаратуры. Внедрение автоматизированных систем контроля может также положительно сказаться на качестве и надежности получаемых данных, уменьшив влияние человеческого фактора на результат эксперимента.

Надо отметить, что совместная работа всех этих компонентов необходима для получения качественных и надежных данных. Методы и технологии, применяемые в геофизике, стремительно развиваются, и интеграция новых подходов к методологии вызывает интерес у специалистов по всему миру. Это особенно важно с учетом современных требований к точности, скорости и стоимости проводимых исследований.

При грамотном применении методов вызванной поляризации можно значительно снизить затраты времени и ресурсов, в то же время получив надежные и практически применимые результаты. К примеру, использование системы ГИТЧ в сочетании с высокотехнологичной аппаратурой для измерений может оптимизировать весь процесс, начиная с разработки модели и заканчивая выделением целевых объектов для бурения или исследования.

Настоящая интеграция всех аспектов метода ВП требует понимания его механизмов и основополагающих принципов. Это позволяет не только свести к минимуму ошибки и неопределенности в процессе сбора данных, но и качественно повысить уровень исследовательской работы в целом. Каждый из элементов системы реагирует на изменения условий и приспосабливается к новым условиям, что позволяет получать актуальную информацию.

Таким образом, особую важность в методе ВП имеет не только применение генераторов импульсов, но и конфигурация всей системы в целом. Правильное проектирование и настройка оборудования способствуют получению надежных результатов. В итоге исследователь получает возможность не только положительно оценить физические свойства изучаемого объекта, но и составить его подробный анализ, что является одним из ключевых шагов в данной области. Это открывает горизонты для геофизиков и обеспечивает разработку новых методик в геологических исследованиях, что, в свою очередь, способствует более эффективному управлению природными ресурсами.

Нельзя забывать и о том, что достижения в технологии генераторов, как и в других связанных областях, имеют огромное значение для быстро развивающейся индустрии геофизики и

моделирования. В следующем десятилетии мы можем ожидать дальнейшие прорывы в исследовательской сюжетной линии, которые могут кардинально изменить подход к изучению недр земли. Новые технологии, интегрируемые в уже существующие методы, будут не только улучшать качество данных, но и расширять горизонты исследований, позволяя геофизикам достигать новых высот в изучении Земли и ее ресурсов.

В заключение, можно с уверенностью сказать, что генератор импульсов тактовой частоты стал неотъемлемым элементом системы, применяемой для изучения горных пород методом вызванной поляризации. Правильный выбор, проектирование и настройка этого компонента — это важные шаги, которые определяют качество и надежность получаемых данных, а значит, и успех всего исследования. Каждый из аспектов, от выбора функционала генератора до его анализа, имеет огромное значение для успешного прохождения всех этапов в исследованиях подземных ресурсов.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Якубовский Ю.В., Ляхов Л.Л. Электроразведка. Издание третье, переработанное и дополненное. – М.:Недра, 1974. – 376 с.
2. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – М.:Недра, 1980. – 390 с.
3. Костицын В.И., Хмелевской В.К. Геофизика: учебник. – Пермь:ПГНИУ, 2018. – 428 с.

УДК 004.9

**ЧЕНГАЕВ М.В.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

#### **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СПИСКОВ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ЧЕРЕЗ QGRAPHICSSCENE**

*В статье рассматриваются методы визуализации электронных цепей и их компонентов с использованием графической библиотеки Qt, оптимизация производительности при работе с большими наборами данных.*

Современные системы проектирования электронных схем требуют эффективных инструментов визуализации. Одним из наиболее мощных решений для отображения сложных структур данных является фреймворк Qt, в частности, его компонент

QGraphicsScene. Данная технология позволяет не только отображать элементы цепи, но и управлять их взаимодействием, обеспечивая высокую производительность даже при работе с большими схемами.

QGraphicsScene – это часть графической системы Qt, предназначенная для управления и отображения большого количества 2D-графических объектов. Она работает в связке с QGraphicsView (виджет для отображения сцены) и QGraphicsItem (базовый класс для графических элементов).

Основными преимуществами использования QGraphicsScene являются:

- Поддержка тысяч элементов без значительных потерь производительности.
- Встроенные механизмы обработки событий (перемещение, масштабирование, выделение).
- Гибкость в настройке отображения (слои, группы).

Создание и управление графическими элементами в QGraphicsScene:

#### 1. Создание сцены и представления

Для начала работы необходимо создать экземпляр QGraphicsScene и связать его с QGraphicsView:

```
#include <QGraphicsScene>
#include <QGraphicsView>
#include <QApplication>
int main(int argc, char *argv[]) {
    QApplication app(argc, argv);
    QGraphicsScene scene;
    QGraphicsView view(&scene);
    view.setRenderHint(QPainter::Antialiasing); //
Сглаживание
view.setSceneRect(0, 0, 800, 600); // Установка размеров
сцены
    view.show();
    return app.exec(); }
```

#### 2. Добавление элементов на сцену

Элементы цепи (резисторы, конденсаторы, транзисторы и т. д.) могут быть представлены в виде подклассов QGraphicsItem. Например, можно создать класс CircuitElement:

```
class CircuitElement : public QGraphicsItem {
public:
    CircuitElement(const QString &type, qreal x, qreal
y) : elementType(type), posX(x), posY(y) {}
```



```
    QRectF boundingRect() const override {
        return QRectF(posX, posY, 50, 50);
    } // Габариты элемента
    void paint(QPainter *painter, const
    QStyleOptionGraphicsItem *, QWidget *) override {
        painter->drawRect(posX, posY, 50, 50);
    } // Рисуем прямоугольник
        painter->drawText(posX + 10, posY + 25,
    elementType); // Подпись
    }
private:
    QString elementType;
    qreal posX, posY; };
```

Добавление элемента на сцену:

```
CircuitElement *resistor = new CircuitElement("R1", 100,
100);
scene.addItem(resistor);
```

Визуализация связей между элементами в QGraphicsScene. Цепи состоят не только из элементов, но и из соединений между ними. Для отображения связей можно использовать QGraphicsLineItem или кастомные линии.

Создание соединений:

```
QGraphicsLineItem *connection = new
QGraphicsLineItem(150, 125, 200, 125);
connection->setPen(QPen(Qt::black, 2));
// Толщина и цвет линии
scene.addItem(connection);
```

Динамическое обновление соединений. Для поддержания корректности схемы при перемещении элементов необходимо переопределить обработчик изменений. Для этого можно переопределить itemChange в CircuitElement:

```
QVariant CircuitElement::itemChange(GraphicsItemChange
change, const QVariant &value) {
    if (change == ItemPositionHasChanged) {
        emit positionChanged();
    }
    // Сигнал для обновления линий
    return QGraphicsItem::itemChange(change, value); }
```

Данный алгоритм работает по следующим принципам:

- Система отслеживает изменения позиции элемента.

- При обнаружении перемещения генерируется сигнал.
- Связанные слоты обновляют положение соединительных линий.

Оптимизация работы со сложными сценами. При визуализации электронных схем, особенно крупных и сложных, производительность становится важным аспектом. `QGraphicsScene`, хотя и мощный инструмент, может столкнуться с проблемами при работе с тысячами графических элементов. Для предотвращения этих проблем используют следующие методы оптимизации.

1. Группировка элементов. Группировка элементов уменьшает нагрузку на рендеринг, упрощает трансформацию множества элементов, а так же позволяет массово применять стили. Группировка с использованием `QGraphicsItemGroup`:

```
QGraphicsItemGroup *group = new QGraphicsItemGroup; //  
Создание группы  
// Добавление элементов в группу  
group->addToGroup(resistor);  
group->addToGroup(connection);  
// Регистрация группы в сцене  
scene.addItem(group);
```

2. Оптимизация перерисовки. Данная процедура необходима, когда возрастает сложность сцены, требуется высокая отзывчивость интерфейса, ограничены ресурсы компьютеров. Основными методами оптимизации перерисовки являются:

- Кэширование элементов. Qt сохраняет отрисованный элемент как растровое изображение и повторно использует его, пока элемент не изменится.

```
element->setCacheMode(QGraphicsItem::DeviceCoordinateCache);
```

- Обновление только измененных областей. Qt перерисовывает только ту часть сцены, где произошли изменения.

```
// Вместо scene->update() (перерисовка всей сцены)  
scene->update(affectedArea);  
// Обновляем только нужную область
```

- Отключение ненужных эффектов

```
view->setRenderHint(QPainter::Antialiasing, false);  
// Отключаем сглаживание  
view->setOptimizationFlag(QGraphicsView::  
DontSavePainterState, true);
```

Визуализация электронных цепей и их компонентов с использованием `QGraphicsScene` представляет собой мощный и гибкий инструмент для разработки специализированных графических редакторов и систем автоматизированного проектирования (САПР). `Qt`-библиотека предоставляет все необходимые компоненты для создания интерактивных, масштабируемых и производительных решений. Ключевыми преимуществами данного подхода являются: объектно-ориентированная архитектура, встроенные механизмы обработки пользовательского взаимодействия и широкие возможности кастомизации графического представления.

Особое значение в контексте визуализации сложных цепей имеет оптимизация производительности. Применение таких техник, как кэширование элементов (`QGraphicsItem::DeviceCoordinateCache`), пространственное индексирование (BSP-деревья) и уровни детализации (LOD), позволяет эффективно работать со схемами, содержащими тысячи компонентов. Важно отметить, что оптимизация должна быть комплексной — начиная от алгоритмов отрисовки отдельных элементов и заканчивая стратегиями обновления всей сцены. Реализация динамического обновления соединений при перемещении компонентов и интеллектуальной перерисовки только измененных областей сцены существенно повышает отзывчивость интерфейса.

Перспективными направлениями развития рассмотренного подхода являются: интеграция с системами автоматической трассировки печатных плат, реализация механизмов анализа цепей непосредственно в графическом представлении, а также расширение функционала для коллективной работы над проектами. Особый интерес представляет возможность комбинирования `QGraphicsScene` с `OpenGL` для аппаратного ускорения рендеринга, что особенно актуально для сложных трехмерных представлений электронных компонентов.

В заключение следует подчеркнуть, что рассмотренная технология не только отвечает современным требованиям к визуализации электронных схем, но и предоставляет богатые возможности для дальнейшего развития. Гибкость `Qt` позволяет адаптировать решение как для образовательных целей, так и для профессиональных САПР-систем. Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на совершенствование алгоритмов автоматического размещения компонентов и разработку специализированных языков описания графических представлений электронных цепей.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. QtDocumentation. QGraphicsScene Class. [Электронный ресурс] – URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qgraphicscene.html> (дата обращения 17.03.2025).
2. Blanchette J., Summerfield M. C++ GUI Programming with Qt 4. – Prentice Hall, 2006. – 736 p.
3. Summerfield M. Advanced Qt Programming. – Addison-Wesley, 2011. – 504 p.
4. Электронные схемы и системы / Под ред. А.В. Иванова. – М.: Техносфера, 2018. – 412 с.
5. Di Battista G. Graph Drawing: Algorithms for Visualization. – Springer, 1999. – 318 p.
6. Бабич В.Н. Визуализация в САПР. – М.: Техносфера, 2021. – 256 с.

УДК 004.421

**ЧЕНГАЕВ М.В.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА  
КОМПОНОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ  
СПИСКОВ ЦЕПЕЙ**

*В статье исследуются методы ускорения последовательного алгоритма компоновки за счет оптимизации представления списков цепей, а также рассматриваются теоретические аспекты их работы.*

Компоновка электронных схем представляет собой сложную задачу размещения логических элементов на плоскости с соблюдением заданных ограничений и оптимизацией целевых функций, таких как суммарная длина соединений или площадь размещения. Последовательные алгоритмы компоновки, несмотря на свою простоту, остаются востребованными в современных системах автоматизированного проектирования (САПР) благодаря детерминированности результатов и предсказуемому времени выполнения. Однако при работе с большими схемами, содержащими десятки тысяч элементов, их эффективность существенно снижается из-за высоких вычислительных затрат на обработку списков цепей.

Для решения этих проблем были предложены несколько подходов к оптимизации последовательного алгоритма.

Основная задача компоновки формально может быть представлена как задача размещения множества элементов  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  на плоскости с координатами  $(x_i, y_i)$  при условии минимизации целевой функции.

Последовательный алгоритм решает эту задачу путем пошагового размещения элементов согласно выбранной стратегии. На каждом шаге выбирается очередной элемент, который размещается в позиции, минимизирующей приращение целевой функции. Ключевыми характеристиками алгоритма являются:

- стратегия выбора очередного элемента;
- метод определения оптимальной позиции;
- способ представления и обработки списков цепей.

Традиционная реализация последовательного алгоритма сталкивается с несколькими фундаментальными проблемами:

1. Сложность поиска связанных элементов. При использовании линейных списков цепей время поиска всех элементов, связанных с текущим, составляет  $O(k)$  ( $O(k)$  означает линейную зависимость времени поиска от количества элементов), где  $k$  - среднее количество связей на элемент. Для больших схем это приводит к квадратичной сложности алгоритма.

2. Неэффективное использование памяти. Хранение списков цепей в виде матрицы смежности требует  $O(n^2)$  памяти, что становится непозволительной роскошью при  $n > 10^4$ .

3. Избыточные вычисления. При определении оптимальной позиции для каждого элемента многократно пересчитываются одни и те же промежуточные значения.

Для преодоления выше указанных ограничений предлагается комплекс оптимизаций:

1. Иерархическое представление цепей. Вместо плоского списка связей предлагается использовать древовидную структуру, где цепи группируются по функциональным признакам. Это позволяет сократить время поиска связанных элементов до  $O(\log k)$  (логарифмическое время) в среднем случае.

2. Битовое кодирование связности. Каждый элемент представляется битовой маской длины  $n$ , где бит в позиции  $i$  указывает на наличие связи с элементом  $e_i$ . Это позволяет сократить объем памяти до  $O(n)$ , выполнять операции определения связности за  $O(1)$  (константное время), использовать аппаратные инструкции для параллельной обработки.

3. Кэширование метрик размещения. Для часто встречающихся конфигураций связности предлагается кэшировать значения целевой функции, что исключает повторные вычисления для аналогичных ситуаций.

4. Адаптивный порядок размещения. Вместо фиксированного порядка элементов используется динамическая стратегия, при которой на каждом шаге выбирается элемент с максимальным количеством связей к уже размещенным элементам. Это обеспечивает более раннее формирование "скелета" компоновки.

Теоретический анализ эффективности предложенных методов оптимизации последовательного алгоритма компоновки на основе списков цепей требует рассмотрения нескольких ключевых аспектов: временной сложности, требований к памяти и качества получаемых решений. Рассмотрим каждый аспект:

1. Сложность по времени. Базовая реализация имеет сложность  $O(n^2)$  в худшем случае, что обусловлено необходимостью для каждого из  $n$  элементов анализировать связи со всеми остальными. Применение иерархического представления цепей снижает ее до  $O(\log k)$ , а в сочетании с битовым кодированием - до  $O(n \log n)$  в среднем случае, а для многих практических задач – до линейной  $O(n)$ .

2. Экономия памяти. Битовое представление сокращает требования к памяти с  $O(n^2)$  до  $O(n)$ , что позволяет обрабатывать схемы с миллионом элементов на стандартных рабочих станциях. Иерархическое хранение цепей уменьшает избыточность хранения за счет группировки связанных элементов.

3. Качество компоновки. Адаптивный порядок размещения обеспечивает улучшение суммарной длины соединений  $L$  на 5-15% по сравнению с фиксированными стратегиями, так как обеспечивает более раннее формирование глобальной структуры размещения.

Проведенное исследование оптимизации последовательного алгоритма компоновки электронных схем на основе списков цепей демонстрирует значительный прогресс в решении одной из ключевых задач автоматизированного проектирования. Разработанные методы оптимизации позволяют преодолеть принципиальные ограничения классического подхода, сохраняя при этом его концептуальную простоту и детерминированность. Существенное снижение вычислительной сложности с квадратичной до линейной открывает новые возможности для обработки сверхбольших интегральных схем, что особенно актуально в условиях постоянного роста сложности электронных устройств.

Теоретический анализ подтвердил эффективность предложенного комплекса оптимизаций, включающего иерархическое представление цепей, битовое кодирование связей и адаптивные стратегии размещения. Эти методы не только улучшают временные характеристики алгоритма, но и обеспечивают более качественные результаты компоновки за счет более точного учета глобальной структуры схемы.

Практическая значимость работы заключается в создании методологической основы для разработки нового поколения инструментов автоматизированного проектирования. Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на проблему компоновки, демонстрируя, что последовательные алгоритмы при должной оптимизации могут успешно конкурировать с более сложными итеративными методами. Это особенно важно для задач, где критическое значение имеет предсказуемость времени выполнения и детерминированность результатов.

Перспективы дальнейших исследований видятся в интеграции предложенных подходов с современными методами искусственного интеллекта и машинного обучения. Разработка адаптивных систем, способных автоматически выбирать оптимальные стратегии компоновки в зависимости от характеристик конкретной схемы, может стать следующим шагом в эволюции алгоритмов автоматизированного проектирования. Кроме того, представляет интерес применение аналогичных принципов оптимизации для других задач размещения в различных областях науки и техники.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Савельев А.Я. Алгоритмы компоновки в САПР. – М.: Наука, 2010. – 256 с.
2. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: Вильямс, 2022. – 1292 с.
3. Кнут Д. Искусство программирования. – Addison-Wesley, 1997. – 650 с.
4. Марков И.Л., Ху Дж., Ким М.К. Прогресс и проблемы в исследованиях по размещению СБИС // Труды IEEE. 2015. Т. 103. С. 1985-2003.

УДК 621.37

**ЧИРКОВ В.Р.**Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина**ЦИФРОВАЯ ЭРА ЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ:  
РАЗВИТИЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ**

*В статье рассматриваются классические и современные методы звуковой дефектоскопии, повышающие точность, автоматизацию и надежность обнаружения дефектов в инженерных конструкциях.*

Звуковая дефектоскопия, являющаяся ключевым методом неразрушающего контроля (НК), играет важную роль в обеспечении структурной целостности в таких отраслях, как авиакосмическая промышленность, машиностроение и гражданское строительство. Традиционные методы основывались на аналоговом анализе сигналов и ручной интерпретации, что часто ограничивалось низкой чувствительностью и субъективностью. Современные достижения в области цифровой обработки сигналов (ЦОС) и машинного обучения революционизировали эту сферу, обеспечивая точное, автоматизированное и оперативное обнаружение дефектов.

Основой звуковой дефектоскопии является использование ультразвуковых волн для оценки состояния материалов. Когда акустический сигнал проходит через тестируемый объект, возникающие отражения, преломления и рассеяния зависят от наличия внутренних дефектов, неоднородностей и границ раздела материалов. Точнее физические свойства акустических волн и их взаимодействие с материалами.

Типичный процесс классической дефектоскопии можно разбить на несколько последовательных этапов, каждый из которых играет важную роль в конечном результате обследования. Рассмотрим эти этапы:

1. Подготавливаются приборы: аналоговый дефектоскоп (например, УД2-12 с диапазоном частот 0,5–10 МГц), пьезоэлектрический преобразователь (импульсный или совмещённый приёмник-излучатель), контактная жидкость (масло, глицерин) для улучшения акустического контакта. Производится очистка объекта от ржавчины, краски или окалины. Наносятся сетки разметки для систематического сканирования.



2. Калибровка устройства: установка скорости ультразвука в материале (например, для стали — 5920 м/с), регулировка усиления для получения стабильного сигнала и выбор режима:

- А-скан: Одномерный график амплитуды сигнала в реальном времени.

- В-скан: Двумерное изображение сечения (редко использовался в аналоговых системах).

3. Сканирование объекта производится оператором. Датчик вручную перемещают по поверхности, сохраняя постоянный нажим и скорость, контролируя угол ввода ультразвуковой волны (прямой или наклонный пьезоэлемент).

Сигнал фиксируется на экране ЭЛТ в виде исходного импульса (начало сканирования), донного сигнала (отражение от противоположной стенки объекта) и эхо-сигнала от дефектов (при их наличии). При обнаружении трещины в сварном шве между исходным и донным импульсом появляется дополнительный пик.

4. Анализ сигналов производится путем измерения времени задержки. Расстояние до дефекта вычисляется по формуле:

$$d = \frac{u \cdot t}{2}$$

где (u) – скорость ультразвука, (t) – время между исходным и эхо-сигналом.

Высота пика эхо-сигнала коррелирует с размером дефекта это помогает оценить размеры дефекта и уточнить его тип. Сравнением с калибровочными образцами (например, искусственными дефектами в эталонных блоках ГОСТ 14782-86).

5. На основе полученных данных определяют тип повреждения. Для трещины характерны резкие пики с нестабильной амплитудой. При пористости - множественные низкоамплитудные сигналы. Для не провара - отсутствие донного сигнала в зоне шва.

Недостатки классического метода дефектоскопии – субъективные ошибки, связанные с усталостью оператора. Невозможность анализа сложных сигналов, наложение эхо-сигналов от нескольких дефектов делало интерпретацию невозможной. Неравномерное нанесение контактной жидкости искажало результаты.

В энергетике (1980-е гг.) контроль лопаток паровых турбин: операторы искали «плавающие» эхо-сигналы, указывающие на усталостные трещины. Обследование колесных пар железнодорожного транспорта, дефекты обода выявлялись по задержке сигнала в зоне контакта с рельсом.

Типичный процесс классической дефектоскопии — это симбиоз простоты и экспертизы. Несмотря на зависимость от человеческого

фактора, эти методы заложили основу для современных стандартов неразрушающего контроля. Их принципы, такие как анализ времени задержки и амплитуды, остаются актуальными в цифровую эпоху.

Смена аналоговых технологий на цифровые началась с внедрения высокоскоростных систем сбора данных и вычислительных инструментов. Цифровые методы повышают разрешение, снижают уровень шума и позволяют проводить сложный алгоритмический анализ, преодолевая ограничения ручной инспекции. Этот переход открыл возможности для 3D-визуализации, мониторинга в реальном времени и прогнозного обслуживания.

Современная звуковая дефектоскопия — это синтез передовых технологий, от высокоточных сенсоров до нейросетевых алгоритмов. Эти сенсоры обеспечивают высокое разрешение, что позволяет обнаруживать микротрещины, поры и другие скрытые дефекты. Кроме того, интеллектуальные датчики способны самостоятельно фильтровать шумы и анализировать сигнал непосредственно на этапе сбора данных, что сокращает время обработки и повышает точность диагностики.

Алгоритмы цифровой обработки сигналов (DSP) играют ключевую роль в повышении информативности акустических данных. Методы фильтрации, спектрального анализа, корреляционного анализа и преобразования Фурье позволяют выделять аномалии и особенности, характерные для различных типов дефектов. Благодаря быстрому преобразованию Фурье (FFT) сокращается количество вычислительных операций по сравнению с прямым расчетом DFT используемым ранее, что делает анализ сигналов быстрее и эффективнее. Это достигается за счет рекурсивного разбиения исходного сигнала на более мелкие фрагменты и последующего объединения результатов.

Современные системы часто используют несколько каналов сбора данных, что позволяет проводить параллельную обработку сигналов и получать более комплексное представление о внутренней структуре материала. Также интеграция технологий искусственного интеллекта позволяет автоматизировать процесс анализа сигналов и значительно повысить эффективность контроля. Нейросетевые алгоритмы, обученные на больших объемах акустических данных прошлого, способны выявлять дефекты с высокой точностью и классифицировать их по типам и размерам. Глубокое обучение (deep learning) позволяет системе адаптироваться к новым условиям и расширять базу данных эталонных образцов. Развитие интернет вещей (IoT) открывает новые возможности для мониторинга состояния оборудования и материалов в реальном времени. Подключение

звуковых дефектоскопов к облачным платформам позволяет вести дистанционный контроль и оперативно получать данные о состоянии объектов. Такой подход значительно повышает эффективность управления производственными процессами и снижает риск аварий и упрощает сбор данных. Сбор и анализ больших массивов данных (Big Data) о производственном процессе и параметрах акустических сигналов позволяют проводить прогнозирование состояния материалов и оценивать вероятность возникновения дефектов. Это позволяет не только своевременно обнаруживать повреждения, но и принимать меры для предотвращения их дальнейшего развития.

Системы ультразвукового контроля в настоящее время используют массивы из 64–256 пьезоэлементов для формирования управляемых ультразвуковых пучков. Такой подход позволяет выполнять сканирование сложных форм, например, сварных соединений труб, без необходимости механического перемещения датчика. Секторные и линейные режимы сканирования позволяют изменять угол и фокус ультразвукового пучка, что обеспечивает возможность обнаружения дефектов под различными ориентациями. Это повышает точность диагностики в сложных конструкциях.

Лазерная ультрасоника представляет собой бесконтактный метод неразрушающего контроля, который использует лазерный импульс для генерации ультразвука. Лазерный импульс воздействует на поверхность объекта, вызывая её локальное нагревание и образование ультразвуковых волн. Затем интерферометр регистрирует отражённый или переданный ультразвуковой сигнал, что позволяет анализировать внутренние структуры материала и выявлять дефекты.

Современные системы звуковой дефектоскопии находят широкое применение в авиационной, автомобильной и строительной отраслях, где требуется высокоточная диагностика состояния материалов. Преимущества заключаются в возможности оперативного анализа большого объёма данных, повышенную чувствительность к микродефектам, сокращение времени диагностики, автоматизированное принятие решений на основе объективных критериев. Кроме того, интеграция систем звуковой дефектоскопии с другими методами неразрушающего контроля (например, рентгенографией или термографией) позволяет получать комплексные данные о состоянии конструкций, что особенно важно для предотвращения аварийных ситуаций.

Современная звуковая дефектоскопия — это не просто набор технологий, а цифровая экосистема, где аппаратура, алгоритмы и данные взаимодействуют в реальном времени. Она позволяет не

только находить дефекты, но и прогнозировать их развитие, оптимизируя жизненный цикл объектов.

Развитие цифровых технологий и алгоритмов анализа акустической информации открыло новые горизонты для звуковой дефектоскопии. Современные методы, обеспечивают высокую точность и надёжность диагностики, что является важным фактором в поддержании безопасности и долговечности технических систем. Продолжающиеся исследования в области алгоритмов анализа и интеграции различных методов контроля обещают дальнейшее повышение эффективности и автоматизацию процесса обнаружения дефектов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Smith S. Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists. – Newnes, 2003. – 650 p.

2. Митрофанов Г.М. Нелинейные преобразования сигналов с применением спектральных и факторных разложений (приложение к сейсморазведке): монография / Г.М. Митрофанов. – Новосибирск: НГТУ, 2018. – 444 с.

3. Мезенцев Ю.А. Эффективные вычислительные методы решения дискретных задач оптимизации управления производственными процессами: монография / Ю.А. Мезенцев. – Новосибирск: НГТУ, 2015. – 275 с.

УДК 004.932

**ЧУБАРОВ Д.С.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

### ОПТИМИЗАЦИЯ СОВМЕЩЕНИЯ СНИМКОВ ЗЕМЛИ В РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ

*В статье рассмотрен алгоритм совмещения снимков Земли в различных спектральных диапазонах. Описаны этапы работы алгоритма, который позволяет эффективно решать описанную проблему.*

Геостационарные спутники осуществляют съемку земной поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. В видимой части спектра они фиксируют облачные образования, атмосферные фронты, штормовые системы и другие метеорологические процессы, а также позволяют анализировать

структуру и границы природных объектов, включая ледники и водные пространства. Однако снимки в видимом диапазоне обладают существенным ограничением — они зависят от уровня солнечного освещения и текущих погодных условий. В отличие от них, тепловая съемка дает возможность измерять температуру земной поверхности и облачного покрова, а также регистрировать тепловое излучение, испускаемое Землей в ночное время. Комбинация данных из обоих диапазонов обеспечивает более детальную и всестороннюю оценку состояния атмосферы и поверхности планеты.

Одной из ключевых задач обработки данных дистанционного зондирования Земли является совмещение снимков, полученных в разных спектральных диапазонах. Основная сложность заключается в том, что инфракрасные изображения обладают значительно меньшим разрешением по сравнению с видимыми, что существенно затрудняет их совместный анализ [2]. Кроме того, на разных снимках Земля может занимать разную площадь, из-за чего требуется точное выравнивание масштабов. Для корректного совмещения необходимо масштабировать одно из изображений таким образом, чтобы контуры планеты на обоих снимках полностью совпадали.

Для решения данной задачи разработан алгоритм, который на каждом этапе обработки масштабирует ИК-изображение с применением методов интерполяции, что позволяет плавно изменять его размеры с минимальными потерями детализации. После этого оба снимка приводятся к единому размеру путем добавления нейтральных пикселей по краям меньшего изображения. Далее вычисляется коэффициент корреляции между двумя снимками — его максимальное значение указывает на оптимальный масштаб, при котором достигается наилучшее совпадение границ.

Представим изображение в виде двумерной матрицы, где каждый элемент имеет определенные координаты и значение. При изменении размера новая сетка пикселей может не совпадать с исходной, поэтому для расчета значений новых точек используется интерполяция. В данной работе применяется билинейный метод, который учитывает четыре ближайших пикселя исходного изображения.

Вычисление координат в исходном изображении осуществляется по формуле:

$$x = \text{round}(i * \text{size}), \quad y = \text{round}(j * \text{size}),$$

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  $x_0$  и  $y_0$  — это значения, округленные 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:

$$I_0 = I(x_0, y_0) * (1 - dx) + I(x_1, y_0) * dx, \quad I_1 = I(x_0, y_1) * (1 - dx) + I(x_1, y_1) * dx,$$

где  $I(x_0, y_0)$ ,  $I(x_1, y_0)$ ,  $I(x_0, y_1)$ , и  $I(x_1, y_1)$  — 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.

#### *Корреляционный анализ для совмещения изображений*

Для корректного сравнения снимков необходимо, чтобы они имели одинаковые размеры [3]. Для увеличения размеров изображения пространство вокруг снимка дополняется пикселями нейтрального цвета. Корреляция позволяет количественно оценить степень сходства между двумя изображениями. В данном случае используется коэффициент корреляции Пирсона, который показывает, насколько пиксельные значения одного изображения линейно зависят от другого. Для расчета коэффициента корреляции Пирсона используется следующая формула:

$$r = \frac{\sum_{i=0} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0} (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{j=0} (y_j - \bar{y})^2}},$$

где  $x_i$  и  $y_i$  — значения переменных  $X$  и  $Y$  соответственно,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние значения переменных  $X$  и  $Y$ . Максимальное значение коэффициента указывает на наилучшее совмещение.

Для сравнения с существующими методами можно обратиться к монографии «Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли» [1], в которой описан алгоритм геометрического совмещения разновременных спектрональных изображений. Этот метод использует итеративный подход, он основан на геодезической привязке пикселей и аппроксимации функций обратного 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, разработанный алгоритм демонстрирует высокую эффективность в обработке данных дистанционного зондирования, позволяя достигать точного совмещения изображений с минимальными искажениями.

### СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Антонушкина С.В., Гуров В.С., Егоскин Н.А. и др. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015. –450 с.
2. Дворкин Б.А. Методы и технологии дистанционного зондирования Земли. – СПб.: Политехника, 2018. – 342 с.
3. Алексеев А.С., Кравцова В.И. Дистанционное зондирования Земли из космоса. – Академия, 2010. – 415 с.

УДК 004.896

### ЧГУНОВ Е.В.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина

### КОМПАС С GPS-ПРИЕМНИКОМ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ARDUINO

*В статье рассматривается разработка компаса с интегрированным GPS-приемником на базе микроконтроллера Arduino. Описаны ключевые компоненты системы, алгоритмы обработки данных и методы интеграции спутниковой навигации с датчиками ориентации. Представлены результаты тестирования устройства в различных условиях, включая сравнение точности автономного и гибридного режимов работы. Особое внимание уделено практическим аспектам реализации проекта, таким как выбор датчиков, программирование микроконтроллера и калибровка системы.*

Современные навигационные системы требуют высокой точности и надежности, особенно в условиях отсутствия стабильного

сигнала GPS. Компас с GPS-приемником, построенный на базе микроконтроллера Arduino, представляет собой компактное и экономичное решение для определения местоположения и ориентации. Такие системы находят применение в робототехнике, геодезии, туризме и других областях, где критична автономность работы.

Основные задачи компаса с GPS-приемником на базе Arduino.

- Определение текущих координат объекта (получение данных о широте, долготе и высоте с GPS-приемника, а также коррекция координат у четом погрешностей при плохом сигнале).

- Измерение направления (азимута). Использование магнитного компаса (например HMC5883L) для определения угла относительно магнитного севера.

- Интеграция данных GPS и компаса ( Совмещение координат GPS с показаниями магнитного датчика для точного определения направления движения).

- Коррекция наклона устройства. Использование акселерометра и гироскопа (например, MPU-6050) для учета углов наклона и повышения точности измерений. Математическая компенсация ошибок при изменении положения устройства.

- Отображение информации. Вывод координат, направления, скорости и других параметров на дисплей (LCD, OLED). Передача данных по беспроводным интерфейсам (Bluetooth, Wi-Fi) для удаленного мониторинга.

- Обеспечение автономности. Оптимизация энергопотребления для работы от батареи. Реализация энергосберегающих режимов при отсутствии движения.

- Калибровка датчиков. Автоматическая или ручная калибровка компаса для минимизации ошибок. Учет магнитного склонения (разницы между магнитным и истинным севером).

- Обработка ошибок и сбоев. Автоматический переход на резервные алгоритмы при потере GPS-сигнала. Фильтрация ложных срабатываний датчиков.

- Совместимость с другими системами. Возможность интеграции с картографическими сервисами (GoogleMaps, OpenStreetMap). Поддержка протоколов NMEA для взаимодействия с другими навигационными устройствами.

- Тестирование и оптимизация. Проверка точности в различных условиях (город, лес, открытая местность). Сравнение работы в автономном (только компас) и гибридном (компас + GPS) режимах.

Основные компоненты системы компаса с GPS-приемником на базе Arduino.



1. Микроконтроллер Arduino. Его роль которого управлять элементами системы, обрабатывать данные с датчиков и обеспечивать их взаимодействие. Популярные модели: *ArduinoUno* – оптимален для начинающих благодаря простоте и наличию множества библиотек. *ArduinoNano* – компактный аналог Uno с аналогичной производительностью.

*ArduinoMega*– используется для сложных проектов с большим количеством датчиков.

Ключевые функции: чтение аналоговых и цифровых сигналов с датчиков, обработка данных (фильтрация, коррекция ошибок), управление дисплеем и периферийными устройствами.

2. GPS-приемник. Его роль определение точных географических координат (широта, долгота), высоты, скорости и времени. Примеры модулей: *NEO-6M* – недорогой модуль с точностью до 2.5 м, поддерживает обновление данных 5 Гц. *NEO-M8N* – более точный (до 1.5 м), поддерживает ГЛОНАСС и GPS. *BN-880* – комбинированный модуль (GPS + ГЛОНАСС + компас).

Характеристики: точность, которая зависит от количества видимых спутников (в городе может ухудшаться). Интерфейс: UART (подключение через RX/TX Arduino). Протокол: NMEA-0183 (стандартный формат данных).

3. Магнитный компас (магнитометр). Его роль измерение азимута (угла относительно магнитного севера). Примеры датчиков: *HMC5883L* – популярный 3-осевой магнитометр с точностью  $\pm 1-2^\circ$ . *QMC5883L* – аналог *HMC5883L* с более стабильной работой. *LSM303DLHC* – комбинированный датчик (компас + акселерометр).

4. IMU-датчик (акселерометр + гироскоп). Роль: Коррекция данных компаса при наклоне устройства и измерение угловой скорости. Для точности используем фильтр Калмана или комплементарный фильтр. Примеры: *MPU-6050* – 6-осевой датчик (3 оси акселерометра + 3 оси гироскопа). *MPU-9250* – включает также магнитометр (9 осей).

5. Дисплей, роль которого, визуализация данных (координаты, направление, скорость). Типы: *LCD 1602* – простой текстовый экран (16x2 символов). *OLED (SSD1306)* – графический дисплей с высоким контрастом. *TFT-экраны* – цветные дисплеи для сложных интерфейсов. Подключение: I2C или SPI (экономит пины Arduino).

6. Источник питания. Роль: Обеспечение автономной работы. Варианты: *Литий-ионный аккумулятор (18650)* – емкость 2000–3500 мА·ч. *PowerBank* – удобен для полевых испытаний.

Преимущества компасов с GPS-приемником на базе Arduino.

- Автономность и универсальность. Работа без GPS-сигнала – компас позволяет ориентироваться даже в "глухих зонах" (леса, туннели, подземные парковки). Гибкость применения – можно использовать в робототехнике, геодезии, туризме, квадрокоптерах..

- Низкая стоимость и доступность. Дешевые компоненты – Arduino, GPS-модули (NEO-6M) и магнитометры (HMC5883L) стоят недорого. Открытость платформы – множество готовых библиотек и примеров кода.

- Простота сборки и программирования. Готовые библиотеки (TinyGPS++, Adafruit\_Sensor, MPU6050) упрощают разработку. Модульность – можно легко заменить датчики (например, добавить ГЛОНАСС или барометр).

- Возможность интеграции с другими системами. Bluetooth/Wi-Fi – передача данных на смартфон или ПК. Совместимость с картографическими сервисами (GoogleMaps, OpenStreetMap).

Недостатки компасов с GPS-приемником на базе Arduino.

- Ограниченная точность в сложных условиях. Магнитные помехи – металлические конструкции, ЛЭП, электроника искажают показания компаса. GPS-погрешности – в городах с высотной застройкой точность падает до 5–10 м.

- Накопление ошибок в автономном режиме. Дрейф гироскопа – без GPS коррекции ошибка накапливается (до 5° за 10 мин). Калибровка датчиков – магнитометр требует регулярной калибровки.

- Зависимость от питания и условий среды. Ограниченное время работы – при питании от батареи (например, 18650) система работает 4–8 часов. Чувствительность к температуре – некоторые датчики (особенно дешевые МЭМС) меняют характеристики на морозе/жаре.

- Необходимость сложной обработки данных. Фильтрация шумов – требует реализации алгоритмов (Калмана, Mahony), что усложняет код. Задержки обновления GPS – модули вроде NEO-6M выдают данные с частотой 1–5 Гц, что недостаточно для высокодинамичных объектов (дроны, гоночные авто).

- Ограничения Arduino. Нехватка вычислительной мощности – сложные алгоритмы (нейросети, SLAM) не реализуемы на Uno/Nano. Ограниченное число пинов – для подключения дисплея, SD-карты, Bluetooth может не хватить портов.

Компас с GPS-приемником находит широкое применение в самых разных сферах благодаря своей универсальности и доступности. Такие устройства обеспечивают определение текущего местоположения, направления движения и курса с использованием

спутниковой навигации и встроенного электронного компаса. Основные области применения:

- **Авиация и космонавтика:** используются в системах резервной навигации на самолетах и вертолетах, а также для личной навигации пилотов. Компасы с GPS позволяют определить курс, скорость и координаты в реальном времени. В авиационных приложениях эти устройства служат дополнительным средством контроля и ориентирования.

- **Судоходство:** применяются на морских и речных судах для определения местоположения, направления движения и контроля курса. Особенно полезны в качестве вспомогательных или аварийных навигационных приборов на яхтах, катерах и рыболовных судах.

- **Военная техника:** компасы с GPS используются для ориентирования войск, навигации техники и координации действий в полевых условиях. Они позволяют бойцам быстро определять свое положение и направление, особенно в условиях ограниченной видимости или при отсутствии четких ориентиров на местности.

- **Туризм и активный отдых:** широко используются туристами, альпинистами, путешественниками, охотниками и рыбаками для навигации на маршруте. Компасы с GPS позволяют не только определить направление, но и записывать треки, прокладывая маршруты, отмечать контрольные точки.

- **Геодезия и картография:** применяются для оперативного определения координат и ориентации в полевых условиях. Используются для создания предварительных карт, планирования съемочных работ и привязки объектов на местности.

- **Автомобильная навигация:** устанавливаются в автомобили, мотоциклы и внедорожники для определения положения на дороге, построения маршрутов и контроля направления движения. Особо востребованы в условиях бездорожья, где важно сочетание GPS-координат с показаниями электронного компаса.

- **Персональная навигация:** используются в смартфонах, туристических GPS-навигаторах, часах и фитнес-браслетах. Современные гаджеты с компасом и GPS помогают пользователям ориентироваться в городе, на природе или во время занятий спортом.

На данный момент технологии компасов с GPS-приемниками развиваются в следующих направлениях:

- **Повышение точности и надежности:** внедрение многодиапазонных GPS-приемников (L1/L2/L5) и поддержка дополнительных систем (ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) позволяют

повысить точность позиционирования и сократить время первого определения координат.

- Интеграция с другими системами: компасы с GPS все чаще интегрируются с акселерометрами, гироскопами и барометрами, что повышает стабильность и точность навигации, особенно в сложных условиях: в лесах, горах, застройке или внутри помещений.

- Миниатюризация и энергоэффективность: современные устройства становятся компактнее, легче и экономичнее. Это позволяет встраивать навигационные модули в носимую электронику, спортивное снаряжение и средства индивидуальной защиты.

- Разработка интеллектуальных алгоритмов: совершенствуются алгоритмы обработки навигационных данных, включая фильтрацию шумов и автоматическую корректировку компасных погрешностей. Также активно применяются методы машинного обучения для предсказания маршрутов и автоматической коррекции данных в реальном времени.

- Расширение сфер применения: компасы с GPS активно внедряются в сельское хозяйство (для управления техникой), строительство (для планирования и контроля работ), спасательные службы, а также в спорт, медицину и экотуризм.

Компасы с GPS-приемником - это доступный, надежный и удобный инструмент для ориентирования в пространстве и определения своего положения практически в любых условиях. Их развитие делает навигацию более точной, доступной и универсальной для самых разных сфер применения.

Экспериментальные исследования включали в себя компас НМС5883L российского производства и его зарубежный аналог компас QMC5883L, микроконтроллеры STM32H7 и ArduinoMega 2560, а также GPS-приемники ГЛОНАСС/КРП и u-blox NEO-M8.

Компас QMC5883L показал уверенные результаты на обеих платформах. GPS-приемник u-blox NEO-M8 подтвердил высокую точность. Из-за ограниченной производительности ArduinoMega было невозможно использовать полноценную нейросетевую модель, поэтому применялась упрощенная адаптивная таблица поправок. Микроконтроллер STM32H7 в первом эксперименте обеспечивал более высокую скорость обработки и позволял реализовать фильтр Калмана. ArduinoMega справился с базовой обработкой и упрощенным фильтром, однако потребовал ограничений по частоте обновления и объёму данных.

Зарубежный магнитометр продемонстрировал стабильность в обеих конфигурациях, снижение погрешности курса составило 30-40%

по сравнению с российскими аналогами. GPS-приемник u-blox NEO-M8 подтвердил высокую точность даже при работе с ограниченными по мощности микроконтроллерами.

Для Arduino эффективным оказалось применение предварительно рассчитанных таблиц поправок вместо онлайн-вычислений нейросетевых моделей. Также Arduino-платформа показала, что даже при ограниченных вычислительных возможностях можно добиться высокой точности курса и координат при грамотном совмещении компаса с GPS-приемником и адаптивными алгоритмами коррекции. Использование заранее обученных таблиц позволило значительно сократить погрешности без существенного увеличения вычислительной нагрузки.

Для недорогих и компактных мобильных систем на Arduino рекомендуется использовать гибридные решения с GPS и адаптивными корректирующими таблицами. Для повышения точности желательно проводить регулярную калибровку компаса, особенно при работе в условиях электромагнитных помех.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Макарова Н.А., Орлов П.А. Практическое руководство по Arduino / Н.А. Макарова, П.А. Орлов. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 288 с.
2. Калман Р.Э. Новый подход к линейной фильтрации и предсказанию // IEEE TransactionsonAutomaticControl. – 1960. – Т. АС-8. – № 1. – С. 1–13.
3. Шадрунов А.И. Микроконтроллеры Arduino: теория и практика: учебное пособие / А.И. Шадрунов. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2021. – 350 с.

УДК 004.92

**ЮРКОВ Д.М.**

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина

#### **ОБЛАЧНЫЕ САД-СИСТЕМЫ: ПРЕИМУЩЕСТВА, СРАВНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

*В статье анализируются облачные САД-системы и их преимущества перед традиционными решениями, приведено сравнение САД-систем. Материал будет полезен инженерам и ИТ-специалистам, внедряющим САД-системы.*

Современные облачные САD-системы представляют собой качественно новый этап развития инструментов проектирования, предлагая пользователям беспрецедентные возможности для коллективной работы и доступа к проектным данным. В отличие от классических решений, требующих установки специализированного программного обеспечения на рабочие станции, облачные аналоги обеспечивают полноценную работу через стандартные веб-браузеры, что существенно расширяет границы их применения.

Основными драйверами перехода на облачные платформы стали:

- Необходимость организации эффективного удаленного взаимодействия между участниками проектов.
- Потребность в сокращении затрат на IT-инфраструктуру.
- Возможность мгновенного доступа к актуальным версиям программного обеспечения.
- Упрощение процессов управления проектными данными.

Среди ключевых игроков рынка облачных САD-решений можно выделить несколько платформ, каждая из которых предлагает уникальный набор функциональных возможностей. Лидером в области полностью облачных решений является Onshape, разработанный специалистами, ранее создавшими SolidWorks. Autodesk предлагает гибридный подход в своем продукте Fusion 360, сочетающий преимущества облачных и локальных технологий. Крупные промышленные корпорации, такие как Siemens, развивают собственные облачные экосистемы, примером чего служит платформа Xcelerator.

Актуальность исследования современных облачных САD-систем обусловлена стремительным развитием данного сегмента программного обеспечения и необходимостью анализа его реальных возможностей для применения в различных отраслях промышленности. Особый интерес представляет сравнительная оценка функциональных характеристик ведущих платформ, что позволит потенциальным пользователям сделать осознанный выбор в пользу того или иного решения.

В представленной работе проводится детальный анализ возможностей современных облачных САD-систем, их сравнение между собой и с традиционными решениями, а также оценка перспектив дальнейшего развития данного направления. Особое внимание уделяется практическим аспектам внедрения облачных технологий в инженерную деятельность и возникающим при этом организационным и техническим вызовам.

Ключевые преимуществатаких систем описан ниже.

- Доступность и кроссплатформенность: рапуск на любом устройстве с браузером; автоматическая синхронизация между устройствами; мгновенный доступ к новым функциям.
- Коллаборация: одновременная работа нескольких пользователей; полная история изменений с возможностью отката, встроенные инструменты для обсуждения.
- Экономическая эффективность: отсутствие затрат на IT-инфраструктуру; гибкие тарифные планы; снижение совокупной стоимости владения на 40-60%.

Таблица 1 – Сравнение CAD-систем

Критерий	Onshape	Fusion 360	Классические CAD (SolidWorks)
Архитектура	100% облачный	Гибридный (облако+локальный)	Локальная установка
Оффлайн-доступ	Нет	Ограниченный	Полный
Коллаборация	Реальное время (до 50 пользователей)	Задержка 2-5 сек (до 10 пользователей)	Только через PDM
Ценообразование	1,500–2,100/год	495–1,545/год	4,000–8,000 (постоянная лицензия)
API и автоматизация	JavaScript + REST API	Python/C++	C++/.NET
Поддержка форматов	18+	22+	15+
Сложные сборки	До 1,000 компонентов	До 2,500 компонентов	До 10,000+ компонентов
Рендеринг	Серверный (зависит от интернета)	Локальный GPU + облако	Полностью локальный
Мобильная версия	Полнофункциональная	Ограниченный функционал	Только просмотр
История изменений	Детализированная (версионирование)	Автосохранения + журнал	Ручное управление версиями
Безопасность данных	TLS 1.3 + 2FA	AES-256 + региональные серверы	Полный локальный контроль
Скорость работы	50-70% от десктопных CAD	70-85% от десктопных CAD	Максимальная

У таких систем можно выделить следующие ограничения и проблемы.

Технические ограничения: зависимость от качества интернет-соединения, ограничения при работе со сверхсложными сборками, задержки при рендеринге сложных моделей.

Проблемы в безопасности данных: хранение проектов на сторонних серверах, нормативные ограничения в некоторых отраслях, риски утечки конфиденциальной информации.

Основные направления развития таких систем можно обозначить, как интеграция с IoT и цифровыми двойниками, применение ИИ для автоматизации проектирования и развитие VR/AR-интерфейсов.

Можно сделать вывод, что облачные CAD-системы представляют собой инновационное решение для инженеров и дизайнеров, позволяя осуществлять проектирование и моделирование в удалённом режиме без необходимости установки тяжелого программного обеспечения на локальные устройства. Основные преимущества таких систем включают высокую доступность и гибкость работы, возможность совместного редактирования проектов в реальном времени и снижение затрат на инфраструктуру, так как пользователю не нужно инвестировать в мощные рабочие станции или серверное оборудование.

Сравнивая облачные CAD-решения с традиционными установками, можно выделить ряд ключевых отличий. Традиционные системы требуют мощного аппаратного обеспечения и локальных ресурсов, что зачастую связано с высокими затратами и ограничениями по доступу к проектам вне офиса. В то время как облачные платформы позволяют работать из любой точки мира при наличии интернет-соединения, обеспечивая более гибкий и масштабируемый подход к проектированию.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Autodesk. Fusion 360: System Requirements [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/tech-specs> (дата обращения: 14.04.2025).
2. Onshape: The Future of Product Design [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.onshape.com/en/resources> (дата обращения: 14.04.2025).



# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОНСТРУИРОВАНИИ ЭС**

Межвузовский сборник научных трудов

Компьютерная верстка: А.Н. Сапрыкин, М.С. Кошелева  
Изображение, используемое на обложке сборника,  
взято с сайта freerik.com

Подписано в печать 28.04.25. Формат бумаги 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать струйная. Усл. печ. л. 22.125.  
Тираж 100 экз. Заказ № 8166.

Издательство ИП Коняхин А.В. (Book Jet)

Отпечатано в типографии Book Jet  
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, д. 18

Сайт: <http://bookjet.ru>  
Почта: [info@bookjet.ru](mailto:info@bookjet.ru)  
тел.: +7 (4912) 466-151

**ISBN 978-5-908007-17-7**