

Сибирский государственный
университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнёва

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

*Сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции
(26–27 февраля 2026 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2026

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2026

УДК 629.7
ББК 39.5
И88

Редакционная коллегия:

В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, Г. М. ГРИНБЕРГ, Е. В. СУГАК, А. В. ГИРН

Под общей редакцией

кандидата технических наук, профессора В. П. НАЗАРОВА

Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный И88 ресурс] : сб. материалов VIII Всерос. науч.-практ. конф. (26–27 февраля 2026 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 7,5 МБ). – Систем. требования: Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) / под общ. ред. В. Ю. Журавлева ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2026. – 246 с. – Режим доступа: <https://www.sibsau.ru/scientific-publication/>, свободный. – Загл. с экрана.

Представлены результаты научных исследований студентов, аспирантов и специалистов высших учебных заведений, НИИ, промышленных предприятий аэрокосмического комплекса региона по приоритетным направлениям отраслей науки и производства. Рассмотрены теоретические и прикладные вопросы разработки и использования современных технологий испытаний и диагностики оборудования и сооружений. Описаны проблемы и указаны пути их решения в области обеспечения надежности и безопасности конструкций.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и специалистов, работающих в области надежности и диагностике изделий.

УДК 629.7
ББК 39.5

Подписано к использованию: 27.03.2026.
Объем 7,5 МБ.

Макет и компьютерная верстка *В.Ю. Журавлева*.

СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

СОДЕРЖАНИЕ

От редакционной коллегии	8
<i>Секция</i> «Современные методы испытаний и диагностики изделий»	
Сугак Е. В. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИКЛАДНОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	9
Бондаренко Т. С., Шестова Е. В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	12
Ебрахими Ф., Агафонов Е. Д. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ С УЧЕТОМ ИХ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ	15
Перепелицын А. В., Журавлев В. Ю. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВИХРЕТОКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	23
Мартынов К. В., Архипов А. В., Воробьев Н. А., Луферчик П. В., Петров И. В. VER-ТЕСТЕР ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ	27
Сердюк Е. В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ	33
Смирнов Е. В., Петров И. В., Луферчик П. В., Комаров А. А., Мартынов К. В. СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ РУЧНОМ МОНТАЖЕ И КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА СБОРКИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	38
Бразговка О. В., Сугак Е. В. ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В КОНТРОЛЬНО-НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	43
Шестова Е. В., Бондаренко Т. С. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	51
Сотников И. Д., Журавлев В. Ю. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	57
Черненко В. В., Черненко Д. В. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕГО КОЛЕСА МАЛОРАСХОДНОГО НАСОСА	63
Бекшаев Н. В. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ – ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	71
Лира М. И., Журавлев В. Ю. РАДИОВОЛНОВОЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ: ПРИНЦИПЫ, МЕТОДИКИ, ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	76

Секция
**«Контроль и диагностика технологических процессов
машиностроения»**

Назаров И. В. КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СРЕДСТВАМИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	81
Назаров И. В., Орешенко Т. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОМЫШЦ НА УДЕРЖАНИЕ СВОБОДНО ПОДВЕШЕННОЙ НАГРУЗКИ	88
Орешенко Т. Г. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПНЕВМОМЫШЦАХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	96
Кишкин А. А., Делкова А. В., Шевченко Ю. Н., Васимов Д. В., Мовчан Н. В. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ПОДВОДА ДОЗВУКОВОЙ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ	104
Чубарь А. В., Загайнов М. С., Юрова Е. Б. ОТРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЛИНЕЙНЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ В СРЕДЕ SIMINTECH	109
Кишкин А. А., Делкова А. В., Шевченко Ю. Н., Васимов Д. В., Мовчан Н. В. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИКИ НА ВНЕЗАПНОЕ РАСШИРЕНИЕ ПО КОНСТРУКТИВНОЙ БАЗЕ ДАННЫХ ПОДВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ МИКРОТУРБИНЫ	115
Причина А. С., Левко В. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГАЛЬВАНОПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ	122
Трифанов И. В., Гордеева К. А. КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ	125
Баглай Г. С., Данилов А. К., Шепета Н. А. ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ПРИСУТСТВИИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД	129
Трифанов И. В. КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	133
Самаке Б. А., Ченцов С. В. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ И УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ОТКАЗОВ	138

Секция
**«Испытания, контроль, надежность систем
автоматического управления»**

Кулагина С. И. АЛГОРИТМЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОТКАЗОВ В ГРУППОВЫХ СИСТЕМАХ УДАЛЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМАМИ	144
---	-----

Заславец В. С. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕНЗОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ ПОДЛОЖЕК	150
Заславец В. С., Федорова П. С. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ ТЕНЗОЭЛЕМЕНТОВ	155
Федорова П. С. ОЦЕНКА СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	162
Терентьев А. С. ПРОБЛЕМА ЗАДЕРЖЕК В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПРИ КОНТРОЛЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ MES-СИСТЕМ	166
Рыжков А. Н. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ РУЛЕЙ В МОДЕЛЯХ РАКЕТ	174
Яхно Р. Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАДЕРЖЕК В ЦИФРОВЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	177
Ткаченко Т. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОСТАНОВКИ ПОД ОХРАНУ	182
Арбузов Э. В. ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УДАЛЁННОГО ДОСТУПА НА ОСНОВЕ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ ВЕН ЛАДОНИ	189
Морозова Д. М. ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ ОРИЕНТАЦИИ НА СОЛНЦЕ	194

Секция

«Контроль и испытания ракетно-космической техники»

Раменский Б. А., Иванов А. С., Рейфшнейдер Д. П. МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ	200
Бекшаев Н. В. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	205
Файзуллин Р. Р., Черненко В. В., Матвеев М. В. CFD-АНАЛИЗ И ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА СО СМЕННЫМИ ПОЛУОТКРЫТЫМИ КОЛЁСАМИ	210
Сбитнев Д. В., Поляк М. Г. ПРОБЛЕМА ЧЕЛОВЕКО-ЦЕНТРИЧНОГО ПОДХОДА К ПРОВЕДЕНИЮ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	217
Журавлев В. Ю., Шестова Е. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	222

Потемкин А. Д., Голубев Е. А., Науменко Д. А., Редкоус Г. Л., Чубарь А. В. ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ОБЪЕКТОМ НА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTESН	226
Иванов А. С. ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕЛЬТА-СИГМА АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ СВЯЗАННЫХ С ИССЛЕДОВАНИЕМ ПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ	231
Борисов Д. А., Сёмин П. В. СОЗДАНИЕ УЧЕБНОЙ МОДЕЛИ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА МЕТОДОМ FDM ПЕЧАТИ	235
Рейфшнейдер Д. П., Кудрявцев Н. А., Раменский Б. А. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ С ЦЕЛЬЮ АДАПТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ К НАЗЕМНЫМ УСЛОВИЯМ	243

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Перед Вами шестой сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции **«Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика»**.

Конференция проводится для студентов, аспирантов и специалистов предприятий и организаций, высших учебных и научно-исследовательских заведений, дает им возможность представить свои разработки, результаты исследований. Конференция – это замечательная возможность общения высококвалифицированных специалистов с новым кругом будущих ученых и производственников.

В сборнике представлены доклады, имеющие отношение к проектированию, созданию, решению научных проблем по обеспечению надежности оборудования, изделий и конструкций, новым подходам к решению вопросов развития методов диагностики и испытания изделий. В связи с тематической направленностью мероприятия организаторы включили в сборник не все научные сообщения, а наиболее интересные и перспективные, характеризующие новизну и глубину проводимых научных исследований.

УДК 631.37

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИКЛАДНОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Е. В. Сугак

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sugak@mail.ru

Приводятся актуальные задачи прикладной теории надежности, связанные с обеспечением надёжности и безопасности технических объектов на разных этапах их жизненного цикла – проектировании, производстве (изготовлении, сборке и монтаже), эксплуатации и управлении. Их решение позволит создавать безопасные технические системы и обеспечить приемлемый уровень техногенного риска. Эти задачи связаны с увеличением сложности технических устройств и ужесточением условий их эксплуатации, что приводит к росту интенсивности отказов.

Ключевые слова: теория надежности, техносферная безопасность, техногенный риск.

В современной технике проблема обеспечения надежности занимает центральное место, являясь одним из определяющих факторов прогресса и эффективности. Значимость надежности многократно возрастает в контексте все более широкого применения сложных технологических систем в промышленности [1].

Рост количества техногенных аварий и катастроф привел к коренному пересмотру принципов обеспечения техносферной безопасности – от концепции «обеспечения абсолютной безопасности» к концепции «обеспечения приемлемого риска» – допустимого уровня риска, оправданного с точки зрения экономических, социальных и экологических факторов, с которым общество готово мириться ради получения положительных результатов своей деятельности [2; 3].

Для оценки и оптимизации техногенного или технического риска широко используются методы теории надежности [4–12]. Поэтому можно считать, что переход к концепции «приемлемого риска» определил возникновение нового направления науки о надежности и начало нового этапа в ее развитии – прикладной теории надежности, связанных с анализом и обеспечением не только надежности, но и безопасности технических систем и, соответственно, приемлемого технического и техногенного риска [13–17]. Таким образом, требования к безопасности технических систем в целом неизбежно трансформируются в требования к их надежности [18].

В настоящее время анализ и обеспечение безопасности сложной техники является доминирующим фактором развития прикладной теории надежности и методы теории надежности становятся поддерживающими технологиями обеспечения техносферной безопасности и должны рассматриваться в тесной взаимосвязи с методами теории безопасности [13; 16–19]. Именно такой системный анализ вопросов надежности и безопасности является отличительной особенностью современного состояния прикладной теории надежности [19–27].

Современный уровень развития науки и техники позволяет создавать высоконадежные конструкции, машины и оборудование, обеспечивающих высокий уровень техно-сферной безопасности. Необходимым условием для этого является комплекс мер, принимаемых на всех стадиях жизненного цикла технических объектов [17]:

– *на стадии проектирования* – выбор рациональных конструктивных и технологических схем, применение современных конструкционных материалов, использование научно обоснованных методик расчета с учетом всех возможных условий эксплуатации, внешних воздействий и внутренних процессов, совершенствование требований по надёжности и правил проектирования элементов изделий с учётом вероятностной природы возникновения отказов, разработка методов прогнозирования надёжности на стадии проектирования;

– *на стадиях изготовления, сборки и монтажа* – контроль используемых материалов и комплектующих изделий, высокий уровень организации и контроля технологических процессов, промежуточные контрольные испытания отдельных элементов, отработанная система приемо-сдаточных мероприятий, оценка стабильности технологического процесса для сохранения показателей качества в заданных пределах;

– *в процессе эксплуатации* – обнаружение и устранение скрытых дефектов на стадии пуска и приработки, разработка и применение системы технического обслуживания и ремонта, включающей комплекс диагностических и планово-профилактических мероприятий, определение причин недостаточной надёжности элементов и разработка мероприятий по их устранению, разработка или корректировка нормативов периодичности и объёма ремонтов, а также норм расхода запасных частей, прогнозирование надёжности объектов в необычных (экстремальных) условиях эксплуатации;

– *в управлении техническими системами* – разработка оптимальных стратегий обслуживания, ремонта или модернизации на разных этапах жизненного цикла, идентификация фактического состояния сложных технических систем, обнаружение предотказного состояния, прогнозирование остаточного ресурса для обеспечения безотказного функционирования техники и предотвращения ущерба окружающей среде при аварийных и нештатных ситуациях, риск-анализ на основе теории надёжности безопасности технических систем с привлечением методов теории вероятностей, математической статистики и современных вычислительных средств, информационных технологий и систем искусственного интеллекта.

Таким образом, актуальные задачи прикладной теории надёжности связаны с обеспечением надёжности и безопасности технических объектов на разных этапах их жизненного цикла – проектировании, производстве, эксплуатации и управлении. Эти задачи связаны с увеличением сложности технических устройств и ужесточением условий эксплуатации, что приводит к росту интенсивности их отказов.

Библиографические ссылки

1. Алейников Д.П. Надёжность и диагностика технологических систем. Учебное пособие. – М.: Мир науки, 2025. – 109 с.
2. Бызов А.П., Ефремов С.В., Лукина Д.В., Пелех М.Т. Социально-экономические аспекты приемлемого риска. – Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2019, № 2, с.166-173.
3. Ямалов И.У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. 5-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2024. – 291 с.
4. ГОСТ Р 27.011–2019. Надёжность в технике. Вероятностный анализ риска технических систем.
5. ГОСТ Р 51901.2–2005. Менеджмент риска. Системы менеджмента надёжности.

6. ГОСТ Р 51901.3–2007. Менеджмент риска. Руководство по менеджменту надежности.
7. ГОСТ Р 51901.5–2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
8. ГОСТ Р 51901.14–2005. Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности.
9. ГОСТ Р 51901.16–2017. Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки.
10. ГОСТ Р МЭК 31010–2021. Надежность в технике. Методы оценки риска.
11. ГОСТ Р МЭК 60300-1–2017. Менеджмент риска. Руководство по применению менеджмента надежности.
12. Рябинина Е.П. и др. Обзор нормативно-технической документации в области обеспечения безопасности. Учебное пособие. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет, 2018. – 115 с.
13. Фёдоров В.П., Нагоркин М.Н. Прикладная теория надёжности технических объектов. Учебное пособие. – Брянск: БГТУ, 2006. – 330 с.
14. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
15. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности: учебник для вузов. Часть 1: Основы теории. 2-е изд. – СПб.: Лань, 2023. – 276 с.
16. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности: учебник для вузов. Часть 2: Надежность технических систем. 2-е изд. – СПб.: Лань, 2023. – 240 с.
17. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности: учебник для вузов. Часть 3: Испытания и контроль. 2-е изд. – СПб.: Лань, 2023. – 288 с.
18. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Практикум. Учебное пособие для вузов. 2-е изд. – СПб.: Лань, 2023. – 312 с.
19. Острейковский В.А. и др. Теория техногенного риска: математические методы и модели. – Сургут: ИЦ СурГУ, 2013. – 320 с.
20. Сугак Е.В. Системный анализ техногенных рисков.- Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Труды Всеросс.научн.конф. – Красноярск, 2003. – т. 2, с. 226-238.
21. Сугак Е.В. Системный анализ и моделирование техногенных рисков.- Вычислительные технологии, 2004, т.9, № 4, с.68-76.
22. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В. Системный анализ и оптимизация техногенных рисков.- Безопасность и живучесть технических систем: Тр. II Всеросс.конф.: Красноярск, 2007, с. 204-209.
23. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В., Игнатъев Д.А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов.- Вестник СибГАУ, Красноярск, 2007, вып.4, с. 43-47.
24. Сугак Е.В., Назаров А.Г. Системный анализ экологической безопасности.- Безопасность и живучесть технических систем. Труды Всероссийской конференции.- Красноярск, 2009, с.80-83.
25. Гришко А.К. Системный анализ надежности сложных технических систем. – Труды международного симпозиума «Надежность и качество», 2021, т.1, с.105-107.
26. Фёдоров В.П., Нагоркин М.Н. Прикладные методы теории надёжности технических объектов и технологических систем. Учебное пособие. – Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 288 с.
27. Северцев Н.А., Бецков А.В. Системный анализ теории безопасности. Учебник для вузов. 2-е изд. – М.: Юрайт, 2026. – 454 с.

© Сугак Е. В., 2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Т. С. Бондаренко, Е. В. Шестова
Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: tank85@inbox.ru

Статья посвящена сравнительному изучению контроля и диагностики оптических методов неразрушающего контроля в ракетно-космической технике. Рассматриваются теоретические основы методов, их применимость к различным типам материалов, надежность, чувствительность, точность, а также практические аспекты использования в промышленности и научных исследованиях.

Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, оптический метод, неразрушающий контроль, глубина проникновения индикатора, ракетно-космическая техника, диагностика дефектов, надежность, точность.

Неразрушающий контроль (НК) оптических методов играет ключевую роль в современной науке и промышленности, обеспечивая точное и безопасное исследование свойств веществ без их повреждения. Это особенно важно для ракетно-космической техники.

Современный этап развития ракетно-космической отрасли характеризуется внедрением многоразовых систем запуска и реализацией длительных орбитальных миссий. Это предъявляет повышенные требования к методам неразрушающего контроля (НК), обеспечивающим надежность критических узлов космических аппаратов. Оптические технологии играют ключевую роль в данном контексте, так как позволяют достигать технологического превосходства за счет высокой точности диагностики. Их применение становится неотъемлемым элементом обеспечения безопасности и эффективности космической техники.

Оптические методы неразрушающего контроля приобретают важное значение для ракетно-космической промышленности. Они обеспечивают выявление микродефектов в композитных материалах и сварных соединениях без нарушения целостности контролируемых объектов. Такая возможность напрямую влияет на экономическую эффективность производства и эксплуатации космических аппаратов. Более того, неразрушающий характер этих методов соответствует строгим требованиям к безопасности в отрасли.

Основная сложность при внедрении оптических методов контроля заключается в многообразии типов дефектов, встречающихся в высоконагруженных элементах космической техники. К ним относятся трещины, коррозионные повреждения, инородные включения в материалах теплозащитных покрытий и топливных баков. Это разнообразие создает значительные трудности при выборе оптимальной технологии диагностики для конкретных условий эксплуатации.

Отсутствие систематизированного подхода к сравнению оптических методов по их информативным параметрам создает риски применения недостаточно эффективных решений. В результате может снижаться надежность критически важных узлов ракет и космических аппаратов. Унифицированная методика оценки позволила бы объективно

сопоставить возможности различных технологий контроля. Это особенно актуально для ответственных конструкций, где недопустимы ошибки диагностики.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа оптических методов неразрушающего контроля и диагностики в ракетно-космической промышленности. Сравнение выполняется по семи ключевым информативным параметрам: амплитудному, фазовому, временному, частотному, поляризационному, геометрическому и спектральному. Такой подход позволит определить оптимальные методы выявления дефектов в зависимости от их природы и локализации. Результаты анализа послужат основой для повышения качества контроля.

Первая задача исследования заключается в изучении теоретических основ оптических методов НК. Особое внимание уделяется физическим принципам работы каждого метода и механизмам регистрации информативных параметров. Анализируются особенности взаимодействия оптического излучения с различными материалами, используемыми в космической технике. Это создает необходимую базу для последующего практического сравнения методов.

Вторая задача предполагает анализ практического применения оптических методов в ракетно-космической отрасли. Рассматриваются реальные примеры диагностики компонентов, таких как корпуса ракет и спутниковые конструкции. Проводится сравнительное сопоставление методов по чувствительности, разрешающей способности и ограничениям для каждого информативного параметра.

Заключительные задачи направлены на разработку рекомендаций по выбору оптических методов контроля в зависимости от типа дефектов и условий эксплуатации. Также оцениваются перспективы интеграции результатов сравнительного анализа в отраслевые стандарты диагностики. Это позволит повысить надежность космической техники за счет оптимизации процессов неразрушающего контроля.

Вывод:

В ходе данной работы был успешно разработан комплексный подход к оптическим методам неразрушающего контроля в ракетно-космической технике. Основой подхода стал сравнительный анализ семи первичных информативных параметров: амплитудного, фазового, временного, частотного, поляризационного, геометрического и спектрального. Это позволило систематизировать методы и создать единую базу для их оценки. Реализация данного подхода полностью соответствует поставленной цели исследования.

Проведённый систематический анализ выявил дифференцированные преимущества каждого метода. Амплитудный и геометрический параметры показали высокую эффективность при выявлении макродефектов. В свою очередь, фазовый и спектральный анализ продемонстрировали повышенную чувствительность к микронеоднородностям в композитных материалах. Временной и частотный методы оказались оптимальными для динамического контроля, а поляризационный – для оценки напряжений в теплозащитных покрытиях.

Практическая апробация подтвердила ценность предложенного подхода для решения конкретных задач отрасли. Применение методов при диагностике сварных швов двигателей и выявлении скрытых дефектов в корпусах ракет показало их высокую эффективность. Это напрямую способствует повышению надёжности и безопасности космических аппаратов. Таким образом, комплексный подход позволяет оптимизировать выбор метода для различных контрольных операций.

Результаты исследования формируют основу для стандартизации оптического контроля в ракетно-космической промышленности. Ключевыми рекомендациями являются комбинирование методов, например, спектрального и поляризационного для композитных материалов. Также важна разработка адаптивных алгоритмов анализа данных. Внедрение этих мер позволит снизить эксплуатационные риски и повысить эффективность контроля.

Библиографические ссылки

1. Воронцов Д.А., Криворотько П.В., Гладкова Н.Д. и др. Компрессионная оптическая когерентная эластография для оценки статуса лимфатических узлов при ранних стадиях рака молочной железы // Вопросы онкологии. – 2023. – № 5. – С. 885–896.
2. Гришанов В.Н., Ойнонен А.А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 1. – С. 24–28.
3. Гуров И.П., Жукова Е.В., Левшина А.В. Применение метода оптической когерентной томографии для изучения предметов искусства, выполненных в технике интарсии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3. – С. 55–59.
4. Жээнбеков А.А. Запись и обработка изображений с применением цифрового голографического интерферометра // Вестник КРСУ. – 2024. – № 12. – С. 69–76.
5. Захаров Ю.Н., Малов А.Н., Попов А.Ю. и др. Исследование когерентных свойств лазерного излучения методами голографии и спекл-интерферометрии // Компьютерная оптика. – 2009. – № 1. – С. 61–65.
6. Кудрявцев В.В., Бочкарев С.В. Анализ перспективных методов контроля качества изделий из композиционных материалов // Современные проблемы теории машин. – 2022. – № 13. – С. 88–93.
7. Кульбацкий Е.Б., Кузьменко Т.Г. О подготовке специалистов-лазерщиков // Лазер-Информ. – 2021. – № 23. – С. 1–3.
8. Пожар В.Э., Балашов А.А., Булатов М.Ф. Современные спектральные оптические приборы НТЦ УП РАН // Научное приборостроение. – 2018. – № 4. – С. 49–57.

© Бондаренко Т. С., Шестова Е. В., 2026

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ С УЧЕТОМ ИХ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ

Ф. Ебрахими¹, Е. Д. Агафонов²

¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 6

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: febrakhimi-a25@mail.stud.sfu-kras.ru¹ evgeny.agafonov@mail.ru²

Представлен метод идентификации нелинейных характеристик на основе модели осциллятора Дуффинга и расширенного фильтра Калмана (РФК). Метод валидирован численным моделированием зашумленного виртуального датчика. Результаты показывают, что алгоритм успешно идентифицирует общую нелинейную динамику, оценивая линейную жесткость с погрешностью <1% (1007,0 Н/м против 1000,0 Н/м), и точно воспроизводит амплитудную частотную характеристику. Выявлена фундаментальная проблема идентифицируемости – сильная взаимозависимость параметров демпфирования и нелинейной жесткости, препятствующая их точной индивидуальной оценке. Работа подтверждает эффективность РФК для описания нелинейного поведения и определяет направление для будущих исследований.

Ключевые слова: вибрационный датчик; идентификация нелинейных систем; расширенный фильтр Калмана (РФК); осциллятор Дуффинга; динамическая калибровка

1. ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные датчики критически важны для мониторинга и диагностики в аэрокосмической отрасли и машиностроении [1]. Точность их данных определяет качество испытаний и безопасность эксплуатации изделий и оборудования [2]. Традиционные линейные модели обеспечивают точность лишь в ограниченном диапазоне [3], тогда как в реальных условиях (высокие вибрации, удары, экстремальные температуры) проявляются нелинейные свойства (гистерезис, насыщение, нелинейная жесткость) [4; 5]. Эти явления создают систематические погрешности, не описываемые линейными моделями, что снижает достоверность измерений. Необходимость решения этой проблемы растет с требованиями к метрологической точности. Идентификация характеристик с учетом нелинейностей стала практической необходимостью для повышения надежности диагностики. Существующие методы (гармонический баланс, ряды Вольтерра) обладают высокой вычислительной сложностью и малоприспособлены для обработки в реальном времени [6]. Таким образом, требуется метод, сочетающий физическую адекватность, устойчивость к помехам и вычислительную эффективность. В данной работе представлен подход к идентификации динамических характеристик вибрационных датчиков на основе расширенного фильтра Калмана (РФК), учитывающий кубическую нелинейность жесткости (модель Дуффинга) [7]. Цель исследования – разработка и верификация алгоритма для оценки параметров нелинейной модели датчика по зашумленным выходным данным в режиме, близком к реальному времени. Идентификация включает не только линейные параметры (масса, демпфирование, линейная жесткость), но и коэффициент нелинейной жесткости, что позволяет точнее прогнозировать поведение датчика в широком диапазоне амплитуд [8]. Научная новизна работы заключается в адаптации структуры РФК для совместной оценки линейных и нелинейных параметров модели с использованием единственного измерительного канала [9; 10; 11]. Практическая значимость состоит в воз-

возможности интеграции метода в процедуры калибровки и самодиагностики интеллектуальных измерительных систем, повышая точность данных натурных испытаний [12; 13].

Структура статьи включает постановку задачи и нелинейной модели, алгоритм идентификации на основе РФК, результаты численного моделирования, демонстрирующие эффективность метода, и ключевые выводы и направления будущих исследований.

II. МЕТОДОЛОГИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

Точная динамическая калибровка вибрационных датчиков, применяемых в ответственных испытаниях, является фундаментальной задачей [14; 15]. Вопреки традиционному линейному представлению («масса-пружина-демпфер»), реальные датчики проявляют значимые нелинейности (например, жесткое упрочнение), ведущие к амплитудно-зависимым погрешностям, которые линейные модели не учитывают. Существующие методы нелинейной идентификации имеют существенные недостатки. Физические («белые») модели часто излишне упрощены, а данные-ориентированные («черные») модели требуют больших наборов данных и теряют физическую интерпретацию. Алгоритмы вроде гармонического баланса вычислительно сложны для работы в реальном времени, а частотные методы чувствительны к шуму. Таким образом, существует потребность в надежном, физически обоснованном «сером» методе, способном эффективно идентифицировать линейные и нелинейные параметры напрямую по зашумленным временным рядам. Цель данной работы – устранить этот пробел путем разработки и валидации алгоритма на основе расширенного фильтра Калмана (РФК), который бы обеспечивал баланс между точностью модели, устойчивостью к помехам и практической реализуемостью для повышения качества диагностики [16].

2.1 Математическая модель нелинейного датчика

Датчик моделируется как осциллятор Дуффинга, расширяющий линейную модель с одной степенью свободы кубическим членом жесткости для учета геометрической нелинейности.

Уравнение движения имеет вид:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + k_1x(t) + k_{nl}x^3(t) = F(t) \quad (1)$$

где, $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ – перемещение, скорость и ускорение, $F(t)$ – возбуждающая сила, m , c , k_1 , k_{nl} – масса, демпфирование, линейная жесткость и коэффициент нелинейной жесткости.

Для оценки параметров уравнение (1) выражается в виде непрерывной модели в пространстве состояний. Вектор состояния включает кинематические состояния и неизвестные параметры:

$$X = [x, \dot{x}, k_1, k_{nl}, c]^T$$

Соответствующие нелинейные уравнения состояния:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x} \\ \ddot{x} &= \frac{1}{m}(F(t) - c\dot{x} - k_1x - k_{nl}x^3) \\ \dot{k}_1 &= 0 \\ \dot{k}_{nl} &= 0 \\ \dot{c} &= 0 \end{aligned}$$

Эта формулировка с постоянными параметрами служит основой для РФК [17].

2.2 Предлагаемое решение: алгоритм расширенного фильтра Калмана (РФК)

РФК выбран благодаря его рекурсивной, оптимальной способности оценки для нелинейных систем. Он линеаризует систему вокруг текущего состояния на каждом временном шаге k .

Дискретные модель процесса и модель измерений представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= f(\mathbf{X}_k, \mathbf{F}_k) + \mathbf{w}_k && \text{(Модель процесса)} \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k = x_k + v_k && \text{(Модель измерений)} \end{aligned}$$

Здесь $f()$ – дискретизированный переход состояния из Ур (1), $\mathbf{H} = [1, 0, 0, 0]$, так как измеряется перемещение, $\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k$ – шум процесса и измерений с ковариациями \mathbf{Q} и \mathbf{R} .

РФК выполняет рекурсивный цикл прогноза-коррекции [18], [19]:

Шаг	Операция	Цель
1. Прогноз состояния	$\bar{\mathbf{X}}_{k k-1} = f(\bar{\mathbf{X}}_{k-1}, \mathbf{F}_{k-1})$	Проецирует состояние вперед, используя нелинейную модель.
2. Прогноз ковариации	$\mathbf{P}_{k k-1} = \mathbf{J}_F \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{J}_F^T + \mathbf{Q}$	Проецирует ковариацию ошибки; \mathbf{J}_F – якобиан $f()$.
3. Коэф. Калмана	$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$	Вычисляет оптимальный коэффициент для коррекции.
4. Коррекция состояния	$\bar{\mathbf{X}}_k = \bar{\mathbf{X}}_{k k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \bar{\mathbf{X}}_{k k-1})$	Корректирует прогноз с учетом измерения \mathbf{z}_k .
5. Коррекция ковариации	$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_{k k-1}$	Обновляет ковариацию ошибки для след. шага.

Этот алгоритм реализован в выделенном классе Python (ExtendedKalmanFilter), который вычисляет нелинейную функцию $f()$ и ее якобиан \mathbf{J}_F на основе уравнения (1) [20].

2.3 Численное моделирование для валидации

Для валидации метода проведено численное моделирование. Виртуальный датчик (параметры: ($m = 0.01 \text{ kg}$, $c = 0.15 \text{ Ns/m}$, $k_l = 1000 \text{ N/m}$, $k_{nl} = 5 \times 10^6 \text{ N/m}^3$)). моделировался интегрированием уравнения (1) методом Рунге-Кутты. Возбуждение $F(t)$ – чирп 5-200 Гц с импульсами – активировало динамику системы. Измеренный сигнал $z(t)$ получен добавлением к истинному перемещению $x(t)$ белого гауссова шума (СКО 5 мкм) [7; 21; 22]. Эффективность РФК оценивалась последующим показателям: 1) сходимости параметров (k_l, k_{nl}, c) к истинным значениям; 2) временной невязке между истинным и оцененным состоянием; 3) валидации ЧПФ – сравнению частотных характеристик идентифицированной и истинной модели [23].

Данная схема моделирования генерирует комплексные результаты (временные ряды, фазовые портреты, графики ЧПФ), которые составляют основу следующего раздела «Результаты», демонстрируя эффективность алгоритма до физического эксперимента.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе представлены результаты численного моделирования, использованного для валидации метода расширенного фильтра Калмана (РФК) для идентификации нелинейной динамики датчика. Анализ фокусируется на точности оценки параметров, валидации модели и ключевых метриках производительности, полученных из выходных данных моделирования. На рисунке 1 показан составной входной силовой сигнал $F(t)$, использованный для возбуждения виртуального датчика, что обеспечивало широкое частотное и амплитудное покрытие.

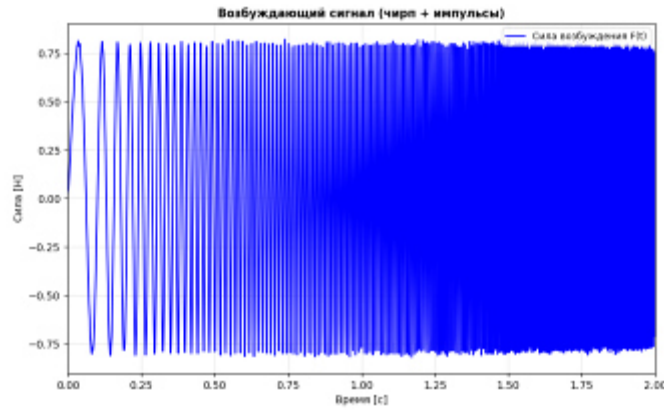


Рис. 1. Возбуждающий сигнал

3.1 Точность оценки параметров и их взаимозависимость

Как показано в таблице 1, алгоритм оценил параметры модели. Результаты демонстрируют контрастную точность. Линейная жесткость (k_{linear}) определена с высокой точностью – 1007.0 Н/м (погрешность +0.70% от 1000.0 Н/м), подтверждая устойчивость к шуму. Однако для нелинейной жесткости (k_{nl}) и демпфирования (c) наблюдаются значительные ошибки (-39.83% и -547.83% соответственно), причем оценка c имеет физически нереалистичный отрицательный знак. Эти сопряженные ошибки прямо указывают на фундаментальную взаимозависимость данных параметров в модели Дуффинга при имеющихся измерениях. Таким образом, хотя общая динамика системы описана верно, однозначное разделение вклада k_{nl} и c представляет собой серьезную практическую проблему идентифицируемости.

Таблица 1.

Сравнение истинных и оцененных значений параметров модели с относительной погрешностью

Параметр	Истинное значение	Оцененное значение	Погрешность
Линейная жесткость, k_{linear}	1000.0 Н/м	1007.0 Н/м	+0.70%
Нелинейная жесткость, k_{nl}	5.00×10^6 Н/м ³	3.01×10^6 Н/м ³	-39.83%
Демпфирование, c	0.150 Нс/м	-0.672 Нс/м	-547.83%

Рисунок 2 показывает сходимость оценки параметров, а рисунок 3 показывает ошибку оценки параметров. Как четко видно на этих рисунках, РФК превосходно справился с идентификацией линейной жесткости (k_{linear}), продемонстрировав надежную работу в зашумленной нелинейной среде.

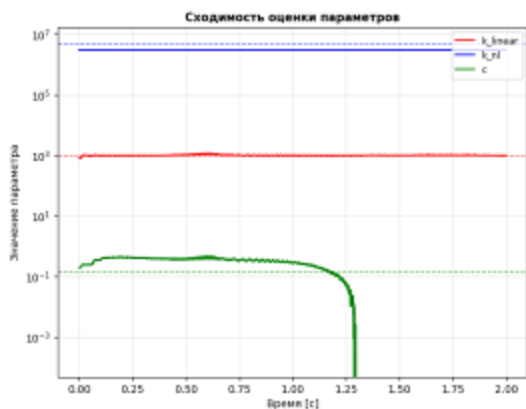


Рис. 2. Сходимость оценки параметров

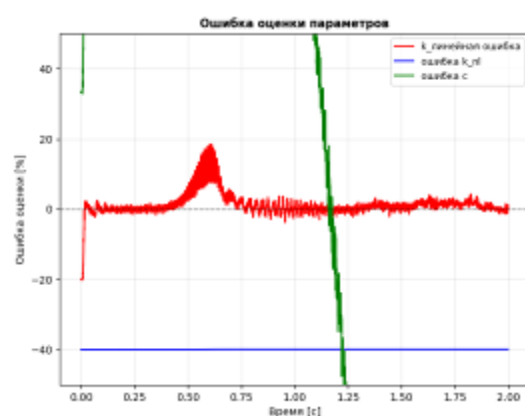


Рис. 3. Ошибку оценки параметров

Значительные сопряженные ошибки в оценках k_{nl} и c указывают на их взаимозависимость в модели Дуффинга. Фазовое соотношение сил демпфирования ($c * \dot{x}_{доп}$) и нелинейной жесткости ($k_{nl} * x^3$) препятствует разделению их вклада по данным только о перемещении. В результате алгоритм сошелся к альтернативному, но физически состоятельному набору параметров, коллективно объясняющему выход системы, что подтверждается близким соответствием истинной и оцененной траекторий на Рисунке 4.

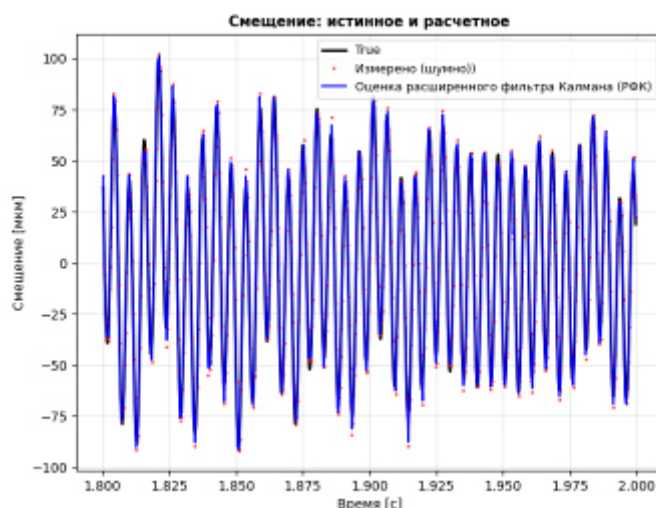


Рис. 4. Истинное и расчетное смещение.

3.2 Валидация идентифицированной нелинейной модели

Несмотря на взаимозависимость параметров, итоговая модель успешно воспроизводит основное нелинейное поведение датчика. Амплитудная (Рис. 5) и фазовая (Рис. 6) характеристики ЧПФ показывают, что «Линейная модель» (на основе истинных k_{linear} и c) значительно отклоняется от «Измеренной» ЧПФ, демонстрируя изгиб резонансного пика. Ключевой результат: ЧПФ «Идентифицированной модели» (с параметрами 1007, $3.01e6$, -0.672) существенно лучше соответствует измеренным данным, подтверждая её предсказательную валидность для целей диагностики.



Рис. 5. Величина РФК

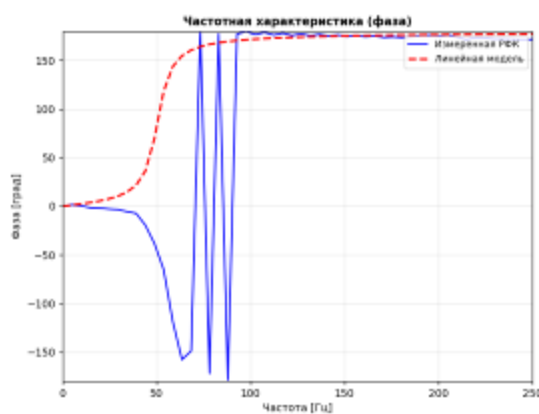


Рис. 6. Фаза РФК

Физическое проявление нелинейности показано на рисунке 7 (нелинейная восстанавливающая сила), где кривая «сила-перемещение» отклоняется от прямой линии, и на рисунке 8 (фазовый портрет), который показывает неэллиптическую траекторию. Оба являются определяющими признаками нелинейной динамики.

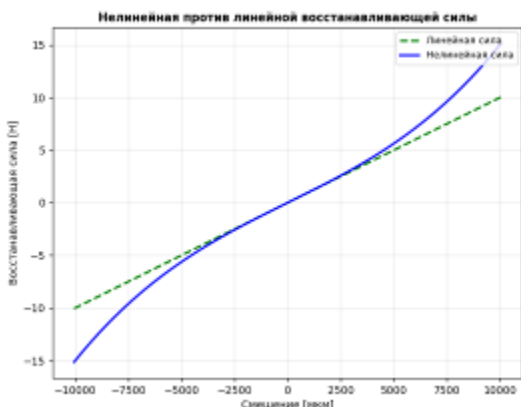


Рис. 7. Нелинейная и линейная восстанавливающая сила

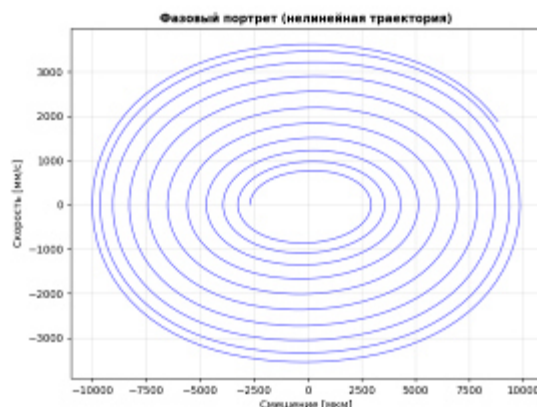


Рис. 8. Фазовый портрет

3.3 Производительность алгоритма и метрики

Алгоритм показал высокую эффективность и корректную настройку. Линейный параметр сошелся с погрешностью $<5\%$ за 0.01 секунды. СКО итоговой последовательности невязок составило 7.05 мкм, что близко к уровню введенного шума (5.00 мкм). Как видно на Рисунке 9, невязки образуют полосовую последовательность с нулевым средним, что свидетельствует об отсутствии немоделированных систематических ошибок.

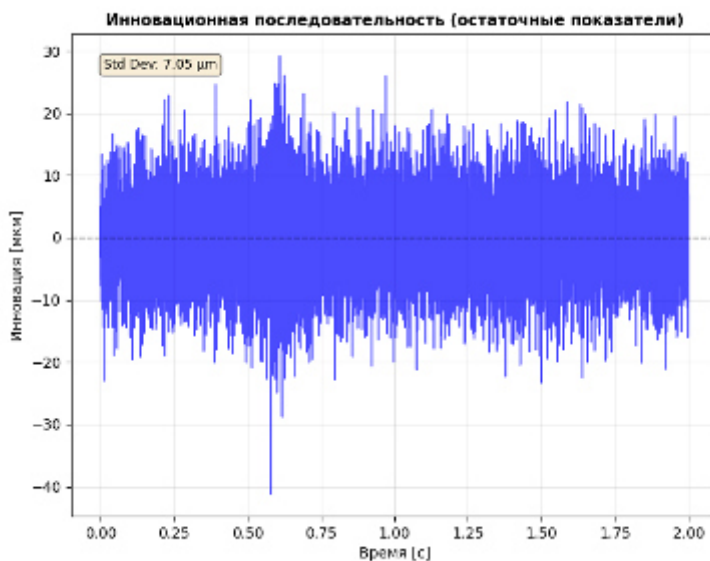


Рис. 9. Последовательность инноваций

Метод на основе РФК эффективен для идентификации общего нелинейного отклика датчика по зашумленным данным, в отличие от линейных моделей. Ключевой вывод — существование практического предела идентифицируемости: точная модель достигнута, но уникальное разделение параметров демпфирования и нелинейной жесткости остается фундаментальной проблемой. Для точного извлечения параметров необходимо ее решить, возможно, через оптимизацию возбуждающих сигналов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили применимость метода идентификации нелинейных динамических характеристик вибрационных датчиков на основе модели Дуфф-

финга и расширенного фильтра Калмана (РФК). Алгоритм показал устойчивость к шуму, обеспечив оценку линейной жесткости с ошибкой 0.70%. Итоговая модель точно воспроизвела ключевой амплитудно-зависимый частотный сдвиг, недоступный для линейных моделей, доказав свою полезность для диагностики, основанной на нелинейном отклике. Однако выявлена фундаментальная проблема идентифицируемости: сильная взаимозависимость параметров демпфирования (c) и нелинейной жесткости (k_{nl}), что привело к значительным ошибкам в их индивидуальных оценках (-39.83% и -547.83% соответственно). Хотя общая динамика системы описана верно, разделение вклада этих параметров по данным только о перемещении затруднительно. Основное направление будущих исследований – проектирование оптимизированных многоосевых возбуждающих сигналов для устранения этой взаимозависимости и экспериментальная валидация метода.

Библиографические ссылки

1. M. Didonna, M. Stender, A. Papangelo, F. Fontanela, M. Ciavarella, and N. Hoffmann, “Reconstruction of Governing Equations from Vibration Measurements for Geometrically Nonlinear Systems,” *Lubricants*, vol. 7, no. 8, p. 64, Aug. 2019, doi: 10.3390/lubricants7080064.
2. Егорушкин А. Ю., Салычев О. С., Особенности использования фильтра Калмана для алгоритмической компенсации погрешностей инерциальной навигационной системы // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018. №12 (84). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ispolzovaniya-filtra-kalmana-dlya-algoritmicheskoy-kompensatsii-pogreshnostey-inertsialnoy-navigatsionnoy-sistemy> (дата обращения: 17.02.2026).
3. S. Yenuganti, H. Zhang, and C. Zhang, “Langasite crystal based pressure sensor with temperature compensation,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 281, pp. 108–116, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.07.012.
4. D. Simon, “Kalman filtering with state constraints: a survey of linear and nonlinear algorithms,” *IET Control Theory & Applications*, vol. 4, no. 8, pp. 1303–1318, Aug. 2010, doi: 10.1049/iet-cta.2009.0032.
5. Balázs Nagy, “Aeroacoustics research in Europe: The CEAS-ASC report on 2010 highlights,” *J. Sound Vib.*, vol. 330, no. 21, pp. 4955–4980, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.jsv.2011.05.015.
6. J. Paduart, L. Lauwers, J. Swevers, K. Smolders, J. Schoukens, and R. Pintelon, “Identification of nonlinear systems using Polynomial Nonlinear State Space models,” *Automatica*, vol. 46, no. 4, pp. 647–656, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.automatica.2010.01.001.
7. E. A. Wan and R. Van Der Merwe, “The unscented Kalman filter for nonlinear estimation,” in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No.00EX373)*, IEEE, pp. 153–158. doi: 10.1109/ASSPCC.2000.882463.
8. H. S. TZOU and D. W. WANG, “MICRO-SENSING CHARACTERISTICS AND MODAL VOLTAGES OF LINEAR/NON-LINEAR TOROIDAL SHELLS,” *J. Sound Vib.*, vol. 254, no. 2, pp. 203–218, Jul. 2002, doi: 10.1006/jsvi.2001.4045.
9. J. P. Noël and G. Kerschen, “Nonlinear system identification in structural dynamics: 10 more years of progress,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 83, pp. 2–35, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ymsp.2016.07.020.
10. G. M. Ismail, M. Abul-Ez, M. Zayed, H. Ahmad, and M. El-Moshneb, “Highly accurate analytical solution for free vibrations of strongly nonlinear Duffing oscillator,” *Journal of Low*

Frequency Noise, Vibration and Active Control, vol. 41, no. 1, pp. 223–229, Mar. 2022, doi: 10.1177/14613484211034009.

11. P. Bao, W. Yi, Y. Zhu, Y. Shen, and H. Peng, “A Spectral Interpretable Bearing Fault Diagnosis Framework Powered by Large Language Models,” *Sensors*, vol. 25, no. 12, p. 3822, Jun. 2025, doi: 10.3390/s25123822.

12. N. Özince, İ. Çiçek, E. C. Mengüç, and N. Acır, “Robust adaptive filters: a comprehensive comparison,” *Signal Image Video Process.*, vol. 19, no. 9, p. 773, Sep. 2025, doi: 10.1007/s11760-025-04119-2.

13. F. Ebrahimi, N. A. Windarko, and A. I. Gunawan, “Reducing THD of 7-Level Packed U-cell Multilevel Inverter Using Genetic Algorithm,” in *2023 International Electronics Symposium (IES)*, IEEE, Aug. 2023, pp. 88–93. doi: 10.1109/IES59143.2023.10242460.

14. F. Ebrahimi, N. A. Wndarko, and A. I. Gunawan, “Wild horse optimization algorithm implementation in 7-level packed U-cell multilevel inverter to mitigate total harmonic distortion,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 5, pp. 34–40, Aug. 2024, doi:

15. J. P. Noël and G. Kerschen, “Nonlinear system identification in structural dynamics: 10 more years of progress,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 83, pp. 2–35, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ymssp.2016.07.020.

16. S. Yenuganti, H. Zhang, and C. Zhang, “Langasite crystal based pressure sensor with temperature compensation,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 281, pp. 108–116, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.07.012.

17. N. Shlezinger et al., “Artificial Intelligence-Aided Kalman Filters: AI-Augmented Designs for Kalman-Type Algorithms,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 42, no. 3, pp. 52–76, May 2025, doi: 10.1109/MSP.2025.3569395.

18. F. Cohen Tenoudji, “Optimal Filtering: Wiener and Kalman Filters,” 2016, pp. 543–562. doi: 10.1007/978-3-319-42382-1_27.

19. *Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No.00EX373)*, IEEE, pp. 153–158. doi: 10.1109/ASSPCC.2000.882463.

20. E. A. Wan and R. Van Der Merwe, “The unscented Kalman filter for nonlinear estimation,” in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No.00EX373)*, IEEE, pp. 153–158. doi: 10.1109/ASSPCC.2000.882463.

21. V. Awasthi and K. Raj, “A Survey of Kalman Filter Algorithms and Variants in State Estimation,” in *Current Approaches in Science and Technology Research Vol. 15*, Book Publisher International (a part of SCIENCEDOMAIN International), 2021, pp. 1–14. doi: 10.9734/bpi/castr/v15/11912D.

22. L. Ding and C. Wen, “High-Order Extended Kalman Filter for State Estimation of Nonlinear Systems,” *Symmetry (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 617, May 2024, doi: 10.3390/sym16050617.

23. K. Chen, P. Zhang, L. You, and J. Sun, “Research on Kalman Filter Fusion Navigation Algorithm Assisted by CNN-LSTM Neural Network,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, p. 5493, Jun. 2024, doi: 10.3390/app14135493.

© Ебрахими Ф., Агафонов Е. Д., 2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВИХРЕТОКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

А. В. Перепелицын, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: perepelitsyn-2020@mail.ru

Статья посвящена анализу преимуществ и недостатков вихретокового метода неразрушающего контроля. В ней рассматриваются основные теоретические положения метода, области его применения для различных материалов, показатели чувствительности и точности, а также особенности практического использования в промышленности.

Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, вихретоковый, трансформаторный метод, параметрический метод, фазовый метод, амплитудный метод, частотный метод, спектральный метод, многочастотный метод, контроль вихретокового метода, приборы вихретокового метода.

Вихретоковый контроль относится к электромагнитным методам неразрушающего контроля и применяется для изделий из токопроводящих материалов. Его основой является явление электромагнитной индукции: при подаче переменного тока на катушку преобразователя вокруг неё возникает переменное магнитное поле, которое наводит в металле вихревые токи (токи Фуко) [1]. Эти токи создают собственное магнитное поле и влияют на параметры преобразователя, прежде всего на его полное сопротивление, а также на амплитуду и фазу выходного сигнала (рис. 1).

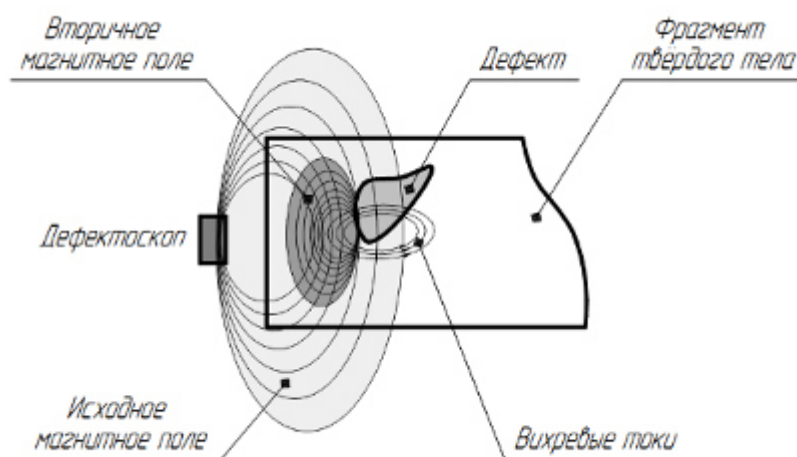


Рис. 1. Принцип действия вихретокового метода

Любые нарушения сплошности, изменения толщины, структуры, проводимости или магнитных свойств материала меняют распределение вихревых токов, поэтому на приборе фиксируется отклик, по которому можно судить о состоянии объекта. В дефектоскопии вихретоковый метод наиболее эффективен для поиска поверхностных и близких к поверхности дефектов, таких как трещины, поры, непровары, зоны коррозии и локаль-

ные неоднородности, при этом метод также широко используют для измерения толщины покрытий и слоёв, оценки электропроводности и магнитной проницаемости, а в ряде случаев и для косвенной оценки металлургических и механических свойств после термообработки или изменения химического состава сплава.

Существенная особенность вихретокового контроля заключается в том, что контроль может выполняться без прямого контакта датчика с изделием. Это повышает скорость диагностики и позволяет контролировать объекты в движении, детали сложной формы и зоны с ограниченным доступом. Актуальность вихретокового неразрушающего контроля объясняется тем, что он обеспечивает быстрое выявление опасных дефектов без демонтажа и разрушения изделия, что критично для авиации, энергетики, машиностроения и нефтегазовой промышленности. Своевременное обнаружение скрытых дефектов позволяет продлевать срок службы конструкций, снижать вероятность аварий и уменьшать расходы на обслуживание. В условиях развития автоматизации и цифровой обработки сигналов вихретоковый контроль становится более производительным, поскольку его результаты легче интегрировать в системы мониторинга качества и в автоматизированные линии.

На практике методы вихретокового контроля различают по характеру взаимодействия поля с объектом, когда регистрируют прошедший или отражённый отклик, по первичному информативному параметру, выделяя амплитудный, фазовый, частотный, спектральный и многочастотный подходы, а также по способу получения первичной информации при измерении электромагнитных полей наиболее распространены трансформаторный (рис. 2) и параметрический варианты (рис. 3) [8].

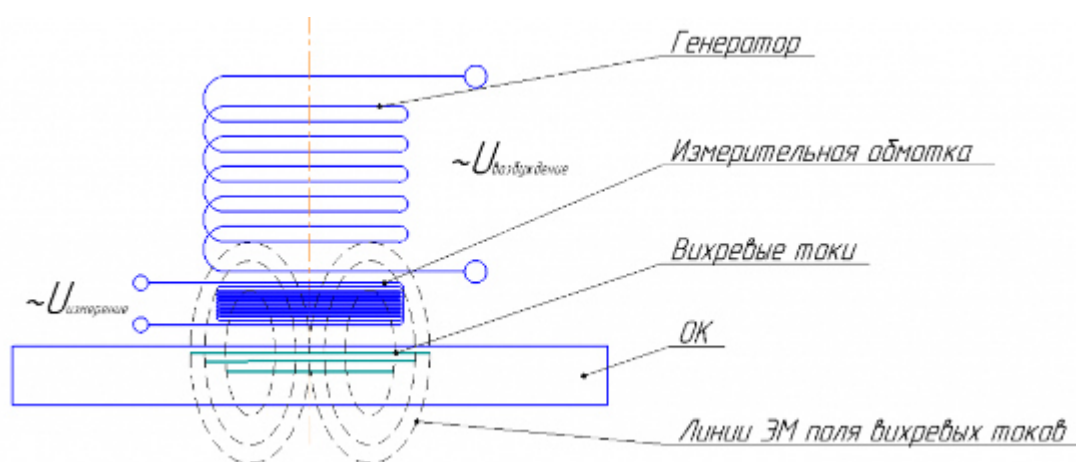


Рис. 2. Принцип работы трансформаторного вихретокового преобразователя

Трансформаторный подход опирается на регистрацию изменения электродвижущей силы на измерительной катушке, связанной с объектом магнитной связью через поле вихревых токов. При появлении дефекта или изменении свойств материала величина вихревых токов и характер их распределения меняются, что приводит к заметному изменению ЭДС, и этот сигнал фиксируется как индикатор дефектности. Такой метод удобен благодаря бесконтактности и высокой производительности, хорошо подходит для экспресс-контроля и автоматизированного сканирования, но его точность часто ограничена тем, что в простейшем варианте оценивается преимущественно изменение амплитуды, а влияние зазора между датчиком и поверхностью может заметно исказить результат.

Параметрический подход основан на измерении изменения электрических параметров преобразователя при взаимодействии с материалом, прежде всего импеданса катушки, который включает активную и реактивную составляющие. Когда объект меняет проводимость, магнитную проницаемость или содержит дефект, изменяется величина потерь

и реакция материала на переменное поле, поэтому импеданс катушки меняется, и прибор регистрирует это как диагностический признак. Параметрический метод даёт устойчивые результаты при правильном выборе частоты и калибровке, позволяет уверенно выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты и широко используется для контроля проводимости и толщины покрытий. При этом он чувствителен к изменению расстояния между датчиком и объектом, поэтому важны стабильность условий и аккуратная подготовка поверхности, особенно если измерения выполняются вручную.

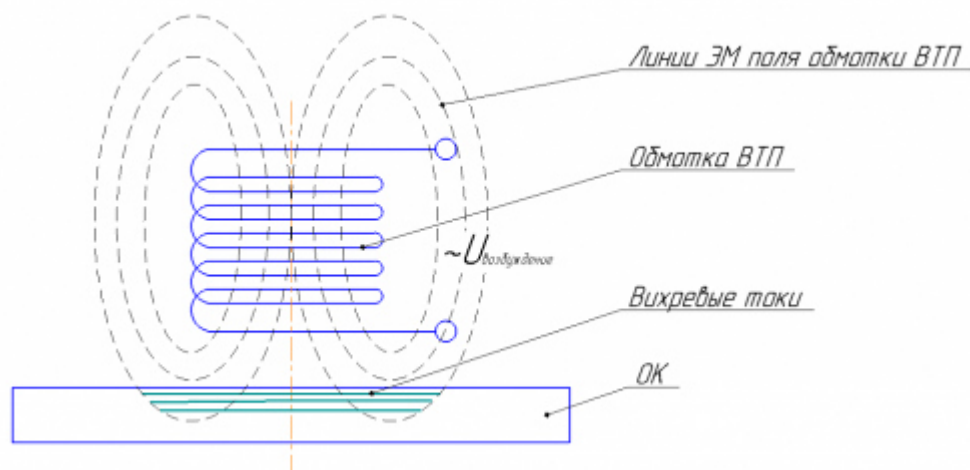


Рис. 3. Принцип работы параметрического вихретокового преобразователя

Амплитудный метод в вихретоковом контроле сводится к анализу изменения амплитуды сигнала преобразователя. Он прост в реализации и удобен для массового контроля, поскольку изменения амплитуды зачастую хорошо коррелируют с наличием трещин, раковин и зон коррозии. Однако амплитудная оценка может быть менее информативной в случаях, когда на сигнал одновременно влияют дефект, шероховатость, геометрия изделия и зазор, из-за чего возрастает вероятность ложных откликов. Для повышения достоверности применяют калибровку по эталонным образцам и выбирают режимы возбуждения, которые усиливают чувствительность именно к интересующему типу дефекта.

Фазовый метод использует дополнительный информативный признак, связанный со сдвигом фазы отклика относительно возбуждающего сигнала. Фазовая информация часто позволяет лучше различать изменения, вызванные дефектом, и изменения, обусловленные внешними факторами, например небольшими колебаниями зазора. Кроме того, фаза тесно связана с глубинным распределением вихревых токов и с характером потерь в материале, поэтому при корректной настройке фазовый анализ помогает отделять поверхностные дефекты от более глубоких и повышает точность выявления мелких трещин. Вместе с тем фазовый метод предъявляет более высокие требования к стабильности опорного сигнала, к качеству калибровки и к квалификации оператора, поскольку интерпретация фазовых диаграмм сложнее, чем простое сравнение амплитуд.

Частотный подход опирается на то, что глубина проникновения вихревых токов зависит от частоты возбуждения: при более высоких частотах токи концентрируются ближе к поверхности и усиливается чувствительность к поверхностным дефектам, а при более низких частотах увеличивается вклад подповерхностных зон. Поэтому, подбирая частоту, можно целенаправленно настраивать контроль под конкретную задачу, а также сравнивать отклики на разных частотах, чтобы лучше определить глубину и характер дефекта. Спектральный метод идёт дальше и рассматривает сигнал в частотной области, анализируя спектр отклика и выделяя частотные признаки, связанные с дефектами, неоднородностями или влиянием покрытий. Такой подход повышает информативность и

хорошо подходит для автоматизации и распознавания паттернов, но требует оцифровки, вычислительной обработки и корректной настройки алгоритмов, иначе возможны ошибки интерпретации. Многочастотный метод объединяет преимущества частотной селекции и сравнительного анализа, поскольку использует сразу несколько частот возбуждения и сопоставляет комплексные отклики. Это повышает точность, позволяет лучше отстраиваться от мешающих факторов и получать более объёмную диагностику по глубине и типу дефекта, однако увеличивает требования к приборной базе, программной обработке и подготовке персонала.

Практическое применение вихретокового контроля включает выбор преобразователя и режима, подготовку поверхности в пределах требований метода, калибровку по эталонным образцам и интерпретацию результата по форме и величине отклика. Результаты могут представляться в виде числовых изменений параметров, графиков сигналов, комплексных диаграмм или карт распределения дефектности при сканировании. На точность и надёжность сильно влияют стабильность зазора, наличие покрытий, состояние поверхности, неоднородность сплава, температура и внешние электромагнитные помехи, поэтому в промышленности часто применяют приспособления для стабилизации положения датчика и регламентированные процедуры калибровки. В целом трансформаторный и параметрический подходы обычно рассматриваются как более доступные по стоимости и трудозатратам решения для широкого круга задач, в то время как фазовый, частотный, спектральный и многочастотный методы обеспечивают более высокую информативность и точность, но требуют более сложной настройки, более дорогого оборудования и более высокой квалификации оператора. Такой выбор позволяет адаптировать вихретоковый контроль под конкретные условия эксплуатации и уровень ответственности изделия, сохраняя главное преимущество метода, а именно выявление дефектов и оценку свойств материала без его повреждения.

Современные вихретоковые приборы, основанные на матричных технологиях, позволяют сохранять объективные данные контроля в виде С-скана с четкой привязкой к координатам. Привязка к координатам позволяет оценивать размеры дефекта. А к сохраненным данным удобно возвращать спустя время для анализа развития дефекта и контроля работы дефектоскописта.

Библиографические ссылки

1. А.Л. Бобров, К.В. Власов, С.А. Бехер. Основы вихретокового неразрушающего контроля: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2019. – 98 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.: ил.
3. Воробьев, И. А. Вихретоковый метод неразрушающего контроля / И. А. Воробьев. – М.: Изд-во МГТУ, 2014. – 204 с.
4. Иванов, В. Г. Теория и практика вихретокового контроля / В. Г. Иванов. – СПб.: Политехника, 2015. – 420 с.
5. Кузнецов, А. П. Неразрушающий контроль материалов / А. П. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 2009. – 256 с.
6. Лапшин, В. Н. Вихретоковый контроль материалов / В. Н. Лапшин. – М.: Техносфера, 2017. – 312 с.
7. Мельников, А. С. Методы и средства неразрушающего контроля / А. С. Мельников. – М.: Наука, 2010. – 368 с.
8. Вихретоковый метод контроля [Электронный ресурс] // Издательский центр "ИУ-СЭР" – URL:<https://ets-ndt.ru/azbuka/metod-vikhretok/> (дата обращения: 02.10.2026)

BER-ТЕСТЕР ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

К. В. Мартынов, А. В. Архипов, Н. А. Воробьев,
П. В. Луферчик, И. В. Петров

НПП «Радиосвязь»
Российская Федерация, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, д. 19
E-mail: martynovkv@radio.ru

Статья раскрывает особенности разработки устройства для BER тестирования многоканальной системы спутниковой связи. Проведено исследование различных реализаций целевого устройства, рассмотрены возможности и ограничения представленных на рынке решений.

Ключевые слова: коэффициент ошибочных битов, псевдослучайная последовательность (ПСП), детектор ошибок ПСП, Ethernet, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), система на кристалле.

Для цифровых систем связи основным критерием надёжности выступает достоверность переданной информации. Её можно оценить путём подсчёта коэффициента ошибочных битов (BER). В отличие от многих других форм тестирования BER позволяет измерить полную производительность системы, включая приёмную, передающую части и среду распространения сигнала.

В пакетных сетях, содержащих только проводную среду передачи данных, метрика BER практически не используется. Ошибки выявляются на уровне кадра или пакета путём подсчёта контрольной суммы кадра CRC32 на канальном уровне или контрольной суммы IP-пакета на сетевом уровне модели OSI.

Гибридные сети содержат как проводной, так и беспроводной канал связи. В таких сетях трафик доходит до потребителя не физически, а путём восстановления на приёмной стороне после прохождения через беспроводную среду, в которой происходит затухание сигнала, а также на сигнал воздействуют шумы, помехи, искажения и т.д. Спутниковые сети относятся к вышеописанному классу сетей. При проверке выполнения требований к надёжности связи в сети необходимо убедиться в том, что метрика BER после прохождения данных через сеть не превышает пороговый уровень на предельных отношениях сигнал/шум.

В данной статье описан процесс разработки устройства для осуществления нагрузочного BER-тестирования. Целевое назначение данной разработки – проверка качества работы централизованной многоканальной системы спутниковой связи, состоящей из спутниковых модемов, выполняющих функции центральной станции (ЦС) и абонентских терминалов (АТ).

Для разрабатываемой системы были поставлены следующие функциональные требования:

- 1) максимальное количество одновременно тестируемых устройств составляет 8;
- 2) максимальная скорость передачи/приёма данных в каждом канале 40 Мбит/с;
- 3) размер кадра 64-1500 байтов;
- 4) удалённое управление системой с ПК.

Тестируемый спутниковый модем имеет возможность передавать, принимать информацию как по проводному соединению, так и по радиоканалу. Тестовые данные будут поступать на модем через сетевой интерфейс и затем после прохождения радиотракта

возвращаться обратно на BER-тестер. Для передачи данных на тестируемое устройство необходимо реализовать сетевые протоколы: добавить к данным заголовки уровней модели OSI, где будут присутствовать сведения об отправителе и получателе, номера протоколов верхнего уровня и другая служебная информация, позволяющая после получения тестируемым устройством сетевого пакета отправить его на обратно на BER-тестер.

Концепция BER-тестирования заключается в том, что BER-тестер генерирует последовательность данных, которая отправляется на тестируемое устройство через канал связи и сравнивается с исходной на приёме. Любые изменения в последовательности помечаются как ошибки и регистрируются [1]. Используя эту информацию, можно посчитать метрику BER как отношение ошибочных битов, выявленных на принимающей стороне, к общему числу отправленных на тестируемое устройство бит.

Фактическая реализация имеет особенность: поскольку ошибки в данных возникают случайным образом, может потребоваться длительный промежуток времени для получения точных показаний. В целях сокращения длительности теста используют псевдослучайную последовательность данных (ПСП). Несовпадение принятой последовательности с исходной приведёт к генерации отличной ПСП на приёме. При достижении установленного числа ошибок необходимо провести повторную синхронизацию с принимаемой ПСП.

Далее приведён анализ коммерческих решений – аналогов разрабатываемой системы.

1) Портативный анализатор Беркут-ЕТ– прибор для тестирования и паспортизации сетей Ethernet, выпущенный российской компанией «Метротек» [2]. В нём имеется 2 Ethernet-порта реализации 10/100/1000 BASE-T, позволяющих одновременно генерировать трафик на 1 порт и получать прошедший через тестируемое устройство трафик на любой из портов. Анализатор реализует помимо BER-тестирования более 4 различных видов тестов. Аналогом данного устройства является тестер-анализатор пакетных сетей МАКС-ЕМ [3]. Оба прибора включены в государственный реестр средств измерений. Однако на каждый модем АТ тестового стенда будет приходиться 1 тестер-анализатор, что приведёт к высокой нагрузке на тестировщика, осуществляющего конфигурацию устройств, а также существенно увеличит стоимость покупки тестового оборудования.



Рис. 1. Внешний вид тестеров-анализаторов (слева – Беркут-ЕТ, справа – МАКС-ЕМ)

2) Многоканальный тестер коэффициента битовых ошибок BERT Keysight M8030A содержит 10 каналов генерации битов и 10 детекторов ошибок. Его основным предназначением является тестирование устройств с PCIe адаптерами и пассивных оптических сетей, поддерживающих стандарты 40 и 100 Гбит/с. Прибор в силу высокой производительности является дорогостоящим оборудованием. Интерфейсы, предоставляемые при-

бором, не совместимы с 8P8C разъёмом, используемом в гигабитном Ethernet тестируемого модемного оборудования.



Рис. 2. Внешний вид многоканального BER-тестера M8030A

3) Программный генератор трафика Cisco TRex – проект с открытым исходным кодом, написанный на языках программирования Python и C++ [4]. Обладает обширной функциональностью: генерация пакетов L2-L7 уровней, многопоточная передача трафика на несколько устройств, максимальная скорость каналов ограничена возможностями сетевой карты (до 200 Гбит/с). Приём пакетов осуществляется по технологии DPDK, позволяющей с помощью драйвера исключить процессорное ядро из обработки пакетов, используя ресурсы сетевой карты. Данное ПО имеет системные требования: на хосте должна быть установлена операционная система на базе Linux. Рекомендовано использование 64-битных CentOS/RHEL 7.6. Подобная система эффективно себя показывает на серверной аппаратуре с большим количеством процессорных ядер и ОЗУ. Опыт использования TRex показал, что генерация псевдослучайных данных ограничена 60 байтами.

В результате анализа установлено, что коммерческие решения обладают недостатками, исключающими возможность их применения при тестировании многоканальной системы спутниковой связи. Это стало основанием для разработки собственного решения для BER-тестирования.

Существует два способа решения данной задачи:

1) Программная реализация. Генерация тестовых данных и их приём осуществляются в процессоре общего назначения.

2) Программно-аппаратная реализация. Элементарной базой данной реализации выступает связка «программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) и процессор общего назначения». В ПЛИС происходит формирование данных и сравнение с эталонными, а процессор конфигурирует ПЛИС, предоставляя конечному пользователю удобный интерфейс взаимодействия с аппаратурой.

Для оценки возможностей программной реализации использовалась консольная утилита «iperf3». Построив сеть из двух ПК с предварительно установленными ОС Ubuntu 20.04.6, на одном устройстве был запущен iperf-сервер, на другом – клиент. Проверялась пропускная способность для разных длин кадра и протоколов 4 уровня (рис. 3).

При генерации UDP трафика с длиной кадра 64 байта максимальная скорость прохождения пакета по сети составила около 35 Мбит/с, что меньше требуемых 320 Мбит/с.

Таким образом, специфика поставленной задачи обусловила необходимость применения аппаратно-программной реализации.

```

user@user2-VirtualBox: ~/Desktop
user@user2-VirtualBox:~/Desktop$ iperf3 -c 10.0.0.1 -u -l 12500 -t 10 -4 -b 1000M
warning: UDP block size 1105 exceeds TCP MSS 1440, may result in fragmentation / drops
Connecting to host 10.0.0.1, port 5201
[ S] local 10.0.0.2 port 44425 connected to 10.0.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bitrate      Total Datagrams
[ S] 0.00-1.00 sec  64.0 Mbytes  536 Mbits/sec  44747
[ S] 1.00-2.00 sec  64.2 Mbytes  539 Mbits/sec  44880
[ S] 2.00-3.00 sec  63.2 Mbytes  530 Mbits/sec  44125
[ S] 3.00-4.00 sec  55.6 Mbytes  468 Mbits/sec  39233
[ S] 4.00-5.00 sec  52.6 Mbytes  441 Mbits/sec  38752
[ S] 5.00-6.00 sec  54.5 Mbytes  457 Mbits/sec  38101
[ S] 6.00-7.00 sec  56.1 Mbytes  471 Mbits/sec  39231
[ S] 7.00-8.00 sec  54.3 Mbytes  455 Mbits/sec  37925
[ S] 8.00-9.00 sec  53.8 Mbytes  452 Mbits/sec  37633
[ S] 9.00-10.00 sec 55.4 Mbytes  465 Mbits/sec  38746
.....
[ ID] Interval      Transfer      Bitrate      Jitter    Lost/Total Datagrams
[ S] 0.00-10.00 sec  574 Mbytes  481 Mbits/sec  0.000 ns  0/401029 (0%) sender
[ S] 0.00-10.04 sec  569 Mbytes  475 Mbits/sec  0.028 ns  3284/401827 (0.82%) receiver

iperf Done.
user@user2-VirtualBox:~/Desktop$ iperf3 -c 10.0.0.1 -u -l 64 -t 10 -4 -b 1000MConnecting to host 10.0.0.1, port 5201
[ S] local 10.0.0.2 port 59728 connected to 10.0.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bitrate      Total Datagrams
[ S] 0.00-1.00 sec  4.61 Mbytes  33.7 Mbits/sec  6378
[ S] 1.00-2.00 sec  3.39 Mbytes  31.5 Mbits/sec  63446
[ S] 2.00-3.00 sec  3.31 Mbytes  32.8 Mbits/sec  64872
[ S] 3.00-4.00 sec  3.97 Mbytes  33.3 Mbits/sec  65879
[ S] 4.00-5.00 sec  3.62 Mbytes  30.2 Mbits/sec  59241
[ S] 5.00-6.00 sec  3.88 Mbytes  32.7 Mbits/sec  63582
[ S] 6.00-7.00 sec  3.89 Mbytes  32.6 Mbits/sec  63655
[ S] 7.00-8.00 sec  3.95 Mbytes  33.1 Mbits/sec  64688
[ S] 8.00-9.00 sec  5.16 Mbytes  48.1 Mbits/sec  81132
[ S] 9.00-10.00 sec  5.41 Mbytes  45.4 Mbits/sec  88672
.....
[ ID] Interval      Transfer      Bitrate      Jitter    Lost/Total Datagrams
[ S] 0.00-10.00 sec  41.8 Mbytes  35.0 Mbits/sec  0.000 ns  0/688312 (0%) sender
[ S] 0.00-10.05 sec  41.8 Mbytes  34.8 Mbits/sec  0.013 ns  0/688312 (0%) receiver

iperf Done.
user@user2-VirtualBox:~/Desktop$

```

Рис. 3. Проверка пропускной способности программой «iperf3»

В качестве элементной базы выбрана отладочная плата Trenz Electronic TE0729-02 с системой на кристалле Xilinx Zynq-7020 [5]. Система на кристалле (СНК) имеет в корпусе микросхемы 2 ядра ARM Cortex-A9 и программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), соединенные несколькими интерфейсами обмена данными. Использование ПЛИС позволяет достичь высокой степени параллелизма в процессе генерации и обработки тестовых пакетов.

Следующим этапом разработана структурная схема BER-тестера (рис. 4).

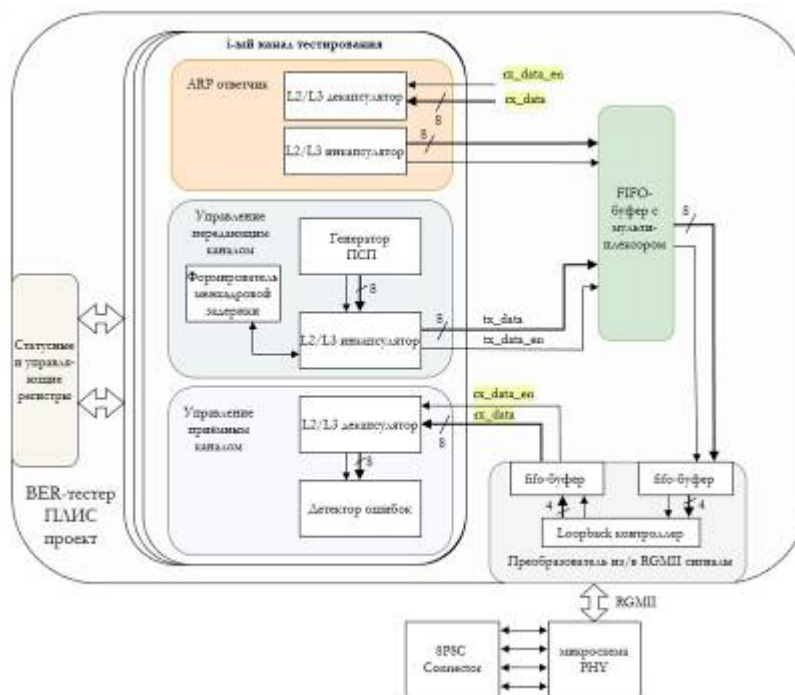


Рис. 4. Структурная схема многоканального BER-тестера

Доступ к статусным и управляющим регистрам осуществляется с ARM-процессора. Блок генерации ПСП в передающем канале генерирует последовательности, соответствующие стандарту ITU-T O.150 [6] длиной 2^9-1 , $2^{11}-1$, $2^{15}-1$, $2^{20}-1$, $2^{23}-1$, $2^{29}-1$ и $2^{31}-1$ бит. Данные генерируются побайтово, так как необходимо обеспечить формирование данных с частотой не менее 320 Мбит/с. Тактовая частота проекта 100 МГц. L2/L3 инкапсулятор – параметризуемый модуль, который может отправлять ответ на ARP-запрос (L2-кадр) или IP-пакеты с тестовыми данными. Внедрение поддержки ARP-протокола обусловлено тем, что тестируемое устройство (модем) перед отправкой пакета обратно отправляет ARP-запрос в сеть с целью определения получателя данных. L2/L3 декапсулятор также может быть использован как для получения ARP-запроса, так и для распаковки тестового пакета и передачи принятой ПСП на детектор ошибок. Детектор состоит из схемы пересинхронизации и генератора ПСП, с аналогичной конфигурацией на передачу. Данные модули объединены в один общий блок i-ого канала тестирования и продублированы 8 раз для создания соответствующего числа каналов тестирования. Коммутация каналов осуществляется в модуле fifo-буфер с предварительным мультиплексированием. С буфера данные преобразуются в сигналы RGMII (стандартный интерфейс взаимодействия канального и физического уровня Ethernet реализации 1000 Мбит/с) и выходят на контакты микросхемы физического уровня Ethernet (PHY).

Опираясь на структурную схему, реализована логика работы ПЛИС на языке описания аппаратуры SystemVerilog, сгенерирована прошивка для Xilinx Zynq-7020. На рис. 5 показан блок-дизайн полученной системы.

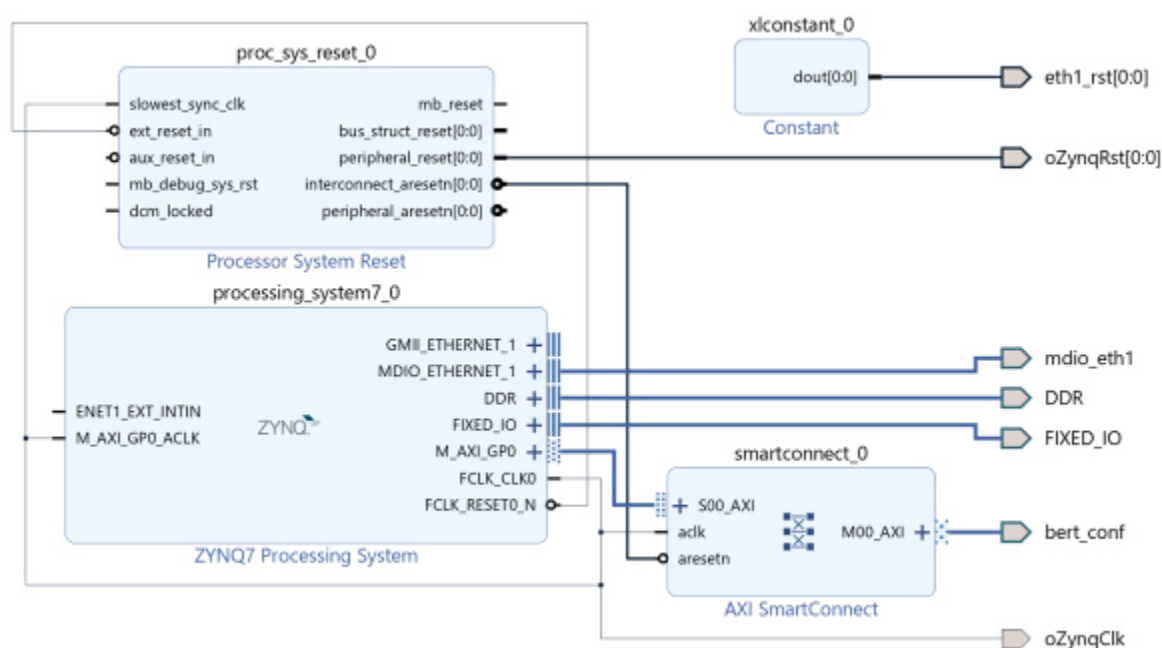


Рис. 5. Блок-дизайн проекта для Xilinx Zynq-7020

Порт bert_conf добавляет статусные и управляющие регистры ПЛИС в адресное пространство процессорной части.

Для конфигурации параметров теста используется программа управления, реализованная в виде Web-сервера на микрофрейворке Python – Flask.

Фрагмент веб-интерфейса для двух каналов тестирования приведён на рис. 6.

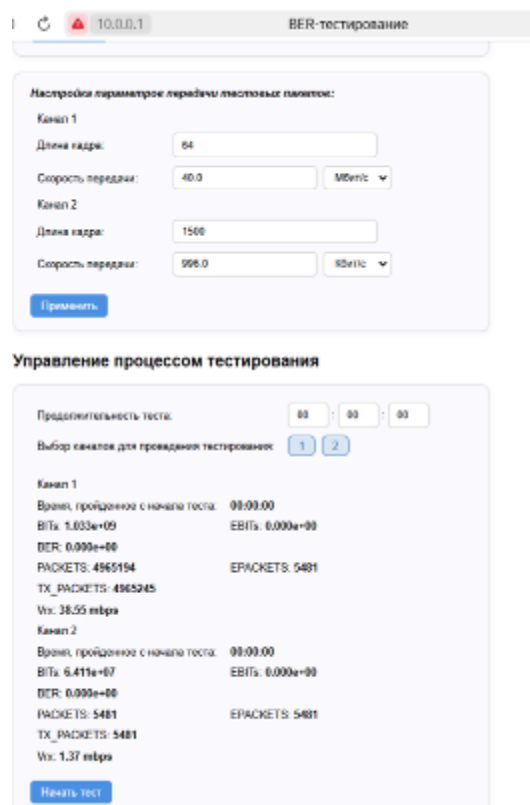


Рис. 6. Веб-страница конфигурации BER-тестера

В результате проделанной работы разработано устройство, которое соответствует поставленным требованиям и применяется при тестировании многоканальной системы спутниковой связи стандарта DVB-S2X. Использование данной разработки способствовало сокращению затрат на организацию испытательного стенда системы связи, автоматизации и ускорению процесса тестирования модемного оборудования.

Библиографические ссылки

1. Poole, I. Bit Error Rate Testing: BER Test // Electronics Notes: reference site for electronics, radio & wireless [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/bit-error-rate-ber/testing-ber.php> (дата обращения: 15.01.2026).
2. Беркут-ЕТ. Описание, характеристики прибора, документы и загрузки [Электронный ресурс]. URL: <https://stc.metrotek.ru/products/testers-analyzers/berkut-et/?ysclid=m2kc19i1q894> (дата обращения: 17.01.2026).
3. МАКС-ЕМ. Описание, характеристики, документация прибора [Электронный ресурс]. URL: <https://kometeh.ru/products/ethernet/maks-em> (дата обращения: 17.01.2026).
4. Trex Realistic Traffic Generator. Documentation. / Cisco Systems, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://trex-tgn.cisco.com/trex/doc/index.html> (дата обращения: 19.01.2026).
5. Trenz Electronic TE0729-02. Documentation [Электронный ресурс]. URL: https://shop.trenz-electronic.de/trenzdownloads-/Trenz_Electronic/Modules_and_Module_Carriers/5.2x7.6/TE0729/REV02/Documents/TRM-TE0729-02.pdf (дата обращения: 25.01.2026).
6. General requirements for instrumentation for performance measurements on digital transmission equipment, Rec. ITU-T O.150 (05/96), ITU Telecommunication Standardization Sector.

© Мартынов К. В., Архипов А. В., Воробьев Н. А.,
Луферчик П. В., Петров И. В., 2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ

Е. В. Сердюк

Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: s_elena_serdyuk@mail.ru

В статье представлена систематизация методов теплового неразрушающего контроля (ТНК) по физическим принципам взаимодействия тепловых полей с объектом и способам получения первичной информации. Проведен сравнительный анализ трех основных видов теплового воздействия – контактного, конвективного и метода собственного излучения – по ключевым критериям: эффективность, стоимость, скорость, глубина контроля, условия применения и требования к персоналу. Рассмотрены способы получения первичной информации.

Ключевые слова: тепловой неразрушающий контроль, методы ТНК, контактный метод, конвективный метод, собственное излучение, сравнительный анализ.

Введение

Неразрушающий контроль – это проверка, контроль, оценка надежности, параметров и свойств технических устройств, зданий и сооружений, при которых не должна быть нарушена их пригодность к применению и эксплуатации [1].

Тепловые методы неразрушающего контроля находят широкое применение в различных отраслях промышленности, благодаря своей способности выявлять дефекты без повреждения объекта и, зачастую, без остановки технологического процесса. Основой этих методов является регистрация и анализ тепловых полей на поверхности или в приповерхностных слоях материалов, возникающих при нагреве или в режиме эксплуатации. Дефекты, такие как трещины, расслоения, пустоты и нарушения теплоизоляции, вызывают локальные искажения температурного поля, которые могут быть зафиксированы с помощью соответствующих измерительных средств [2].

Тепловой неразрушающий контроль может быть использован для качественной и количественной оценки уровня тепловой защиты, энергосбережения и энергетической эффективности [3].

Современная классификация методов ТНК включает в себя два основных направления:

- по характеру взаимодействия физических полей с объектом – контактный, конвективный и метод собственного излучения;

- по первичному информативному признаку – термометрический, теплотрический [2].

В данной статье проводится систематизация наиболее распространенных методов ТНК и их сравнительная оценка с целью определения оптимальных областей применения в зависимости от технико-экономических и эксплуатационных критериев [4].

Методы ТНК по характеру теплового воздействия

Тепловой контактный метод

Тепловой контактный метод основан на передаче тепла от источника к объекту через прямой контакт. Нагрев осуществляется с помощью нагревательных элементов, прижа-

тых к поверхности, а измерение температуры проводится контактными датчиками (термопарами, термосопротивлениями). Метод классифицируется как термометрический, так как основным измеряемым параметром является температура [2]. Преимущества метода: высокая точность локальных измерений, простота реализации, низкая стоимость оборудования. Недостатки: ограниченная зона контроля, необходимость физического контакта, влияние качества прилегания датчика, медленный процесс теплопередачи. Объекты применения: сварные швы, локальные узлы оборудования, теплоизоляционные покрытия. Методы получения первичной информации: термокраски, термобумага, термозависимые параметры, калориметрический метод [4].

Конвективный метод

Конвективный метод использует передачу тепла за счет движения нагретой среды (воздуха, жидкости) вокруг объекта. Это активный метод, при котором создается искусственный поток тепла. Нарушение теплообмена в зоне дефекта приводит к формированию температурной аномалии, регистрируемой датчиками [2]. Метод классифицируется как термометрический, так как анализируется тепловой поток. Применяется в авиационной промышленности для контроля композитных панелей, обшивки, сварных швов [5]. Преимущества: возможность контроля крупногабаритных и сложнопрофильных объектов, отсутствие необходимости в механическом контакте источника нагрева, эффективен для поверхностных и подповерхностных дефектов. Ограничения: зависимость от внешних условий (влажность, сквозняки), необходимость стабильного потока, длительное время термической выдержки. Методы получения первичной информации: жидкие кристаллы, термолюминофоры, оптический интерференционный метод [4].

Метод собственного излучения

Метод собственного излучения – пассивный метод, основанный на регистрации естественного инфракрасного излучения объекта, возникающего при его нагреве в процессе эксплуатации. Все тела с температурой выше абсолютного нуля излучают в ИК-диапазоне, интенсивность которого висит от температуры и эмиссивности поверхности [2]. Классифицируется метод как термометрический. Применяется для диагностики электрооборудования, подшипников, трубопроводов под нагрузкой [5]. Преимущества: бесконтактность, высокая скорость контроля, возможность мониторинга в реальном времени, безопасность при диагностике под напряжением. Ограничения: зависимость от эмиссивности поверхности, ограниченная глубина контроля (поверхностный), слабая чувствительность при малых температурных градиентах, влияние отраженного излучения. Методы получения первичной информации: пирометрический, жидкие кристаллы, термолюминофоры [4].

Сравнительный анализ по технико-экономическим критериям

Эффективность

Наибольшую чувствительность демонстрирует оптический интерференционный метод, позволяющий выявлять микродефекты за счёт регистрации интерференционной картины. Пространственное разрешение достигает долей миллиметра, что делает его незаменимым в аэрокосмической отрасли. Однако метод требует строгих условий (отсутствие вибраций, стабильная температура).

Доступность и простота применения

Наиболее доступным является пирометрический метод. Современные лазерные пирометры стоят от 2000 до 5000 рублей, просты в использовании, но требуют корректной настройки эмиссивности. Не позволяет получить полное температурное поле.

Распространённость

Лидеры – пирометрический метод и методы на основе термозависимых параметров. Они встроены в системы автоматического управления двигателей, котлов, электрощитов и обеспечивают непрерывный мониторинг и цифровую фиксацию данных.

Стоимость

Самые дешевые – термокраски (от 300 руб.) и термобумага (от 100 руб. за лист). Однако они не позволяют проводить количественный анализ и не фиксируются в цифровом виде.

Самый дорогой метод – калориметрический, требующий дорогостоящего оборудования, расходных материалов и квалифицированного персонала.

Требования к квалификации персонала

Наиболее высокие требования – к операторам оптического интерференционного и калориметрического методов. Необходимы знания в области оптики, теплопередачи, физической химии, умение интерпретировать сложные термограммы.

Сравнительный анализ по характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом

Сравнительная характеристика методов теплового неразрушающего контроля представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов теплового контроля

Критерий	Тепловой контактный метод	Конвективный метод	Метод собственного излучения
Характер передачи тепла	Теплопроводность (прямой контакт)	Конвекция (перенос тепла газом или жидкостью)	Тепловое излучение (инфракрасное)
Вывод: Контактный метод наиболее точный по локализации, но медленный; конвективный равномернее, но менее контролируемый; собственного излучения бесконтактный и быстрый, но только для объектов с температурным градиентом.			
Источник нагрева	Нагревательный элемент в контакте с объектом	Горячий пар или жидкость	Нет внешнего источника, используется тепло собственного объекта
Вывод: Метод собственного излучения единственный полностью пассивных из всех методов.			
Режим контроля	Активный (чаще всего) или пассивный (редко)	Активный	Пассивный
Вывод: Пассивный метод безопасный и не влияет на объект, но менее информативен при отсутствии перегрева.			
Глубина проникновения тепла	Низкая (1-3 мм)	Средняя (2-5 мм)	Поверхностная (0,1-0,5 мм)
Вывод: Для внутренних дефектов контактный и конвективный методы предпочтительнее.			
Скорость контроля	Низкая (требуется время на контакт)	Средняя (зависит от скорости потока среды)	Высокая (мгновенная съемка)
Вывод: Для диагностики больших площадей наиболее предпочтительный метод собственного излучения.			
Оборудование	Контактные нагреватели, термопары, регистраторы	Тепловые пушки, камеры, термощкафы	Тепловизоры, пирометры
Стоимость оборудования	Низкая	Средняя	Высокая
Вывод: Контактный метод наиболее простой и доступный, но требует физического доступа; конвективный доступный, но требует источника потока тепла; собственного излучения наиболее дорогой и зависит от качества оборудования (разрешение, чувствительность)			

Автоматизация и обработка данных	Низкая (часто ручная фиксация)	Средняя (возможна интеграция с системами)	Высокая (автоматический анализ термограмм)
Вывод: Контактный метод в основном ручной; конвективный – возможна автоматизация на производственных линиях; собственного излучения легко интегрируется в системы мониторинга.			
Условия применения	Лаборатория, ремонтные участки, локальный контроль	Промышленные печи, сушильные камеры	Полевые условия, диагностика в эксплуатации
Объекты контроля	Сварные швы, теплоизоляция, локальные дефекты	Строительные конструкции, обшивка, панели	Электрооборудование, подшипники, трубопроводы
Вывод: Выбор метода зависит от типа объекта, условий доступа и режима работы. Контактный или конвективный методы используются когда нужны точность и глубина. Если важны скорость, безопасность и контроль в реальном времени, то подойдет метод собственного излучения.			
Квалификация персонала	Специалисты I и II уровня	Специалисты I и II уровня	Специалисты II и III уровня
Вывод: Метод собственного контроля предъявляет наивысшие требования к квалификации. Контактный и конвективный методы могут выполняться менее квалифицированным персоналом при наличии четких инструкций.			

Специалисты I уровня (среднее или среднетехническое образование) могут проводить измерения, регистрировать данные, но не могут интерпретировать результаты и не выбирают методику.

Специалисты II уровня (среднее, среднетехническое или высшее образование по профилю) могут самостоятельно проводить контроль, выбирать методику, составлять инструкции, интерпретировать результаты, выдавать заключение.

Специалисты III (высшее образование по направлению «Неразрушающий контроль») уровня разрабатывают методики, руководят персоналом, проводят аттестацию, решают сложные диагностические задачи [6].

Вывод: Представленные методы – контактный, конвективный и метод собственного контроля – являются принципиально разными подходами к тепловому контролю. Каждый из методов имеет свою четкую нишу применения.

Контактный метод можно выбирать при необходимости точного и локального контроля в лабораториях или на производстве. Конвективный метод используется для равномерного нагрева крупных или сложных по форме объектов. Метод собственного излучения предпочтительнее выбирать для быстрой бесконтактной диагностики в условиях эксплуатации.

Пирометрический и термозависимые параметры – наиболее распространены и надежны. Термокраски, термобумага, жидкие кристаллы – нишевые решения для визуальной диагностики. Термолюминофоры, калориметрический и оптический интерференционный методы – высокотехнологичные, применяются при выполнении научных и оборонных задач.

Выбор метода зависит от цели контроля, доступности, требуемой точности и бюджета, свойств объекта, требуемой скорости. Часто используется комбинированный подход: сначала используется пассивный осмотр (собственное излучение), затем активный контроль (контактный или конвективный).

Таким образом, вышеперечисленные методы дополняют друг друга, покрывая весь спектр задач неразрушающего теплового контроля – от лабораторных исследований до эксплуатационной диагностики сложных промышленных систем.

Заключение

Методы ТНК образуют иерархическую систему, где выбор определяется не только физическим механизмом теплообмена, но и требованиями к точности, скорости, доступ-

ности и квалификации персонала. Тепловой контактный метод остается золотым стандартом для точных локальных измерений. Конвективный метод незаменим при диагностике теплообменных систем. Метод собственного излучения обеспечивает бесконтактный, быстрый и безопасный контроль в реальных условиях эксплуатации.

Ни один метод не является универсальным. Оптимальный выбор требует комплексной оценки всех факторов. В перспективе развитие гибридных методов, сочетающих преимущества различных подходов для повышения чувствительности, точности и автоматизации процессов неразрушающего контроля. Комбинированный подход, например, предварительная диагностика по собственному излучению с последующим активным контролем позволяет повысить достоверность результатов.

Потенциал современного теплового контроля связан с существенным прогрессом в области тепловизоров и тепловизорных модулей, на базе которых возможно создание роботизированных комплексов, предназначенных для фрагментарного контроля поверхности больших изделий. В то же время возродился интерес к сканирующему тепловому контролю при испытаниях крупногабаритных изделий цилиндрической и конической формы с использованием линейных источников нагрева. Для принятия решения о качестве изделий по результатам теплового контроля успешно применяют нейронные сети, которые особенно эффективны при испытании однотипных изделий [7].

Библиографические ссылки

1. Науменко, А.П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль: учеб. пособие / А.П. Науменко. – Омск : изд-во ОмГТУ, 2019. – 152 с. – Текст: непосредственный.

2. ГОСТ Р 53698-2009. Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. №1103-ст : введен впервые : дата введения 2011-01-01 – Москва : Стандартинформ, 2010. – 8 с.

3. Сеницын, А.А. Неразрушающий тепловой контроль конструктивно изолированного корпуса / А.А. Сеницын, И.Г. Ахметова, О.В. Соловьева // Глобальная энергия. – 2022. – Т. 28, №4. – С. 21-30.

4. ГОСТ Р 56511-2015. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования : национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06.07.2015 г. №874-ст. : введен впервые : дата введения 2016-06-01 – Москва : Стандартинформ, 2019. – 8 с.

5. Неразрушающий контроль и диагностика / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.: под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 2003. – 656 с.

6. ГОСТ Р ИСО 9712-2019. Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 декабря 2019 г. №1330-ст : взамен ГОСТ Р 54795-2011/ISO/DIS 9712 : дата введения 2020-03-01 – Москва : Стандартинформ, 2019. – 30 с.

7. Вавилов, В.П. Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) / В.П. Вавилов // Дефектоскопия. – 2023. – №6. – С. 38-58.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ РУЧНОМ МОНТАЖЕ И КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА СБОРКИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Е. В. Смирнов¹, И. В. Петров², П. В. Луферчик³,
А. А. Комаров², К. В. Мартынов⁴

НПП «Радиосвязь»

Российская Федерация, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, д. 19
E-mail: ¹ip_sev@mail.ru, ²dsp@krtz.su, ³lpv@krtz.su, ⁴martynovkv@radio.ru

В статье представлен анализ производственной проблемы, заключающейся в низкой скорости ручного монтажа электронной аппаратуры и последующего контроля качества сборки электрической части изделия. Разработана программно-аппаратная система поддержки принятия решений при монтаже электронной аппаратуры. Осуществлено внедрение в производственную эксплуатацию системы и рассчитан эффект от внедрения.

Ключевые слова: автоматизация, диагностика, испытания, контроль качества, система поддержки принятия решений, электронная аппаратура.

Автоматизация позволяет предприятиям увеличить эффективность производственных процессов, сократить количество брака, снизить затраты на ресурсы и повысить безопасность труда. При этом существует ряд задач, которые невозможно или нецелесообразно полностью автоматизировать ввиду требований к тонкой настройке оборудования, а также индивидуального подхода к производству конкретной партии продукции.

Одним из таких производственных процессов является монтаж проводов, идущих от стороны приборных разъемов до разъемов, соединяющихся с печатной платой, или до контактов под пайку на печатной плате. На текущий момент времени при осуществлении монтажных работ персонал использует электромонтажные чертежи и таблицы (рисунки 1, 2). В таблице указано, какие контакты должны быть соединены при монтаже, однако процесс поиска нужной строки занимает существенное время, кроме того увеличивается риск неправильного соединения из-за человеческого фактора. Такую ошибку можно обнаружить при последующем проведении контроля качества, где представителем ОТК (отдел контроля качества) будут вручную проверяться правильность проводного монтажа в соответствии с технической документацией. Подобный подход снижает производственные темпы и допускает вероятность брака [1].

Провод- ник	Откуда идет	Куда поступает	Данные провода	Длина, см	Приме- чание
32	X52/23	X55/23 (A1/XP2)	Кабель поз. 110	55	
33	X52/24	X55/24 (A1/XP2)			
34	X52/25	X55/25 (A1/XP2)			
35	X52/26	X55/26 (A1/XP2)			
36					

Рис. 1. Часть электромонтажной таблицы

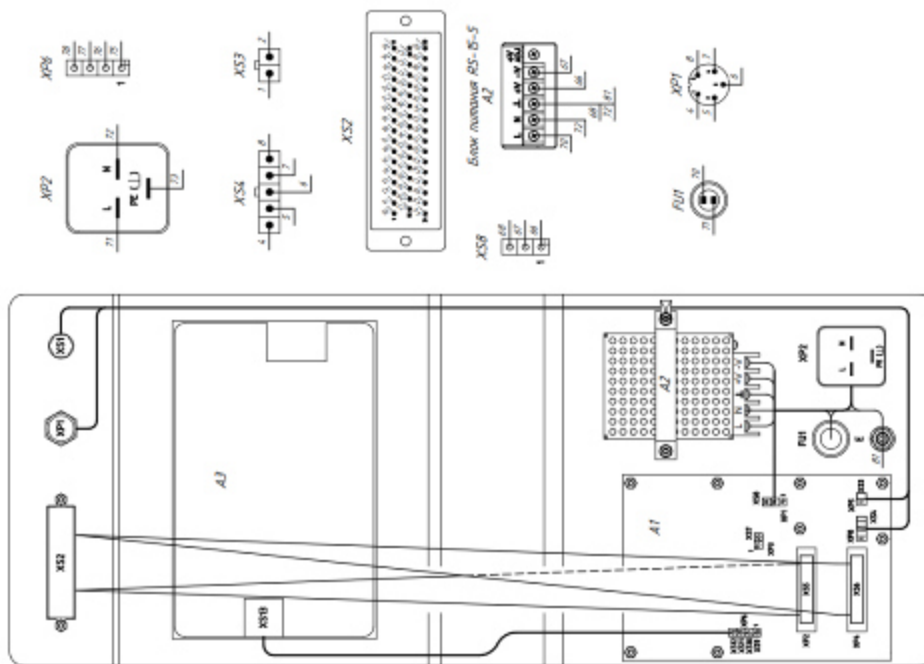


Рис. 2. Электромонтажный чертеж

В большинстве случаев для облегчения процесса монтажа на провода, припаянные к стороне приборного разъема, надеваются специальные бирки (шильдики) с нанесенными на них позиционными обозначениями и номерами контактов разъемов, к которым припаяны эти провода. Данные бирки изображены на рисунке 3.

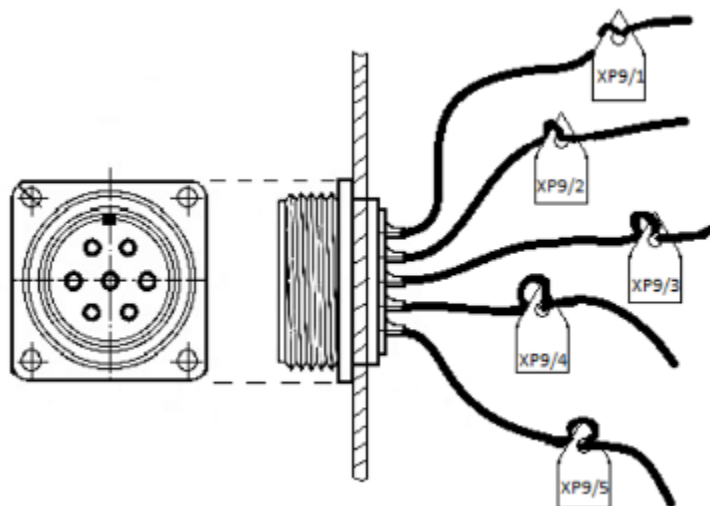


Рис. 3. Вид приборной вилки с припаянными проводами и установленными на них бирками

Руководствуясь надписями на бирках, монтажник открывает монтажную таблицу и в столбце «Откуда идет» находит строку, в которой указано позиционное обозначение приборного разъема с номером контакта и в соседнем столбце «Куда поступает» видит информацию о том, на какой контакт внутреннего разъема или контакт на плате под пайку должен идти этот провод. Кроме того, в таблице указаны площадь сечения, тип и длина используемого провода. Далее руководствуясь электромонтажной схемой, производится монтаж.

Такой процесс можно оптимизировать, заменив использование бирок системой поддержки принятия решений при ручном монтаже и контроле качества электронной аппаратуры ТИП-50 (тестер-идентификатор проводов) [2, 3]. Решение основано на парадигме активного сопровождения программно-аппаратной системой. В её состав входят блоки обработки и отображения информации, порты ввода/вывода и порты расширения. Такая система позволяет идентифицировать проводники и выводить информацию о них из монтажных таблиц в упрощенном виде на экран [4]. На рисунке 4 представлена структурная схема прибора ТИП-50.

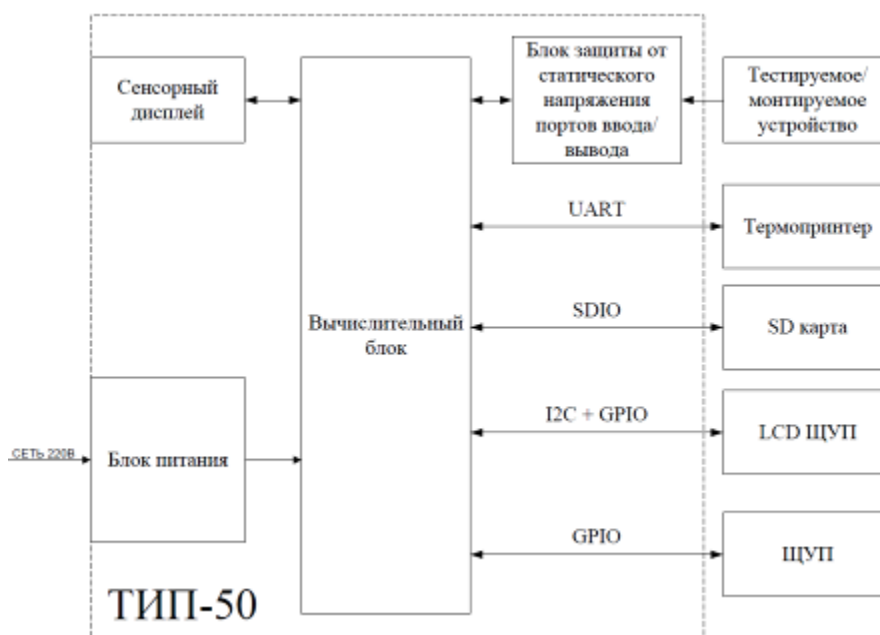


Рис. 4. Структурная схема прибора ТИП-50

Прибор выполнен на базе семейства микроконтроллеров STM32F1, имеющего различные интерфейсы, обеспечивающие гибкость при подключении внешних модулей описанных ниже.

Сенсорный дисплей диагональю 5 дюймов и разрешением 800x480 имеет интуитивный русскоязычный графический интерфейс, посредством которого осуществляется контроль режима работы прибора ТИП-50. В режиме идентификации проводов разъемы монтируемого изделия подключаются к портам ввода/вывода прибора ТИП-50 через соединяющий кабель. При контакте щупа с монтируемым проводником на сенсорный дисплей выводится информация о номере соединения в монтажной таблице, «Откуда идет», «Куда поступает», а также дополнительная информация о соединении, необходимая для ручного монтажа или проверки соответствия электрических соединений технической документации. В меню настроек пользователь может изменить параметры прибора ТИП-50 для личного удобства, а также произвести самодиагностику прибора. Кроме того, есть возможность осуществления прозвонки цепи с визуальным и звуковым сопровождением.

Эргономичный пробник с OLED-дисплеем отображает информацию о соединении на небольшой экран, расположенный на ручке пробника, благодаря чему персонал может производить работу, не отрывая взгляда от объекта монтажа или проверки. Пробник подключается кабелем к корпусному разъему «ЩУП LCD» прибора «ТИП-50» и использует интерфейс передачи данных «I2C».

К разъему «ЩУП LCD» возможно подключение модуля расширения «P1-ИДП». Данный модуль расширения совместно с прибором «ТИП-50» позволяет осуществлять ав-

томатическую проверку правильности электрических соединений выполненного монтажа. «Р1-ИДП» – устройство, формирующее сигнал с высоким логическим уровнем на каждом из своих выводов. Проверка монтажа осуществляется следующим образом: модуль расширения по команде от прибора «ТИП-50» последовательно выводит сигнал на каждый из своих выходных портов, подключенных к корпусному разъему проверяемого устройства. Сигнал передается по проводам от корпусного разъема на внутренний разъем, предназначенный для соединения с печатной платой; к внутреннему разъему подключаются входные порты прибора «ТИП-50» и детектируют сигналы от модуля расширения; прибор «ТИП-50» осуществляет проверку целостности и правильности электрических соединений путем сопоставления выведенных и принятых сигналов и соответствия контакта таблице коммутации. Данный режим подходит для проверки многожильных кабелей и пассивных коммутационных плат без электронных компонентов.

SD карта объемом до 32ГБ позволяет хранить таблицы коммутации различных приборов, что делает ТИП-50 универсальным и пригодным для проверки множества изделий.

Порты ввода/вывода позволяют осуществлять проверку вплоть до 50 каналов тестируемого устройства.

К разъему UART возможно подключение термопринтера для печати бирок при необходимости.

На рисунке 5 представлен внешний вид запатентованного промышленного образца прибора ТИП-50.



Рис. 5. Фотография прибора ТИП-50

Ключевые преимущества данного прибора:

- универсальность и гибкость – прибор может быть использован для монтажа любой электронной аппаратуры при наличии загруженной монтажной таблицы и сочленяющего кабеля;
- модульность и масштабируемость – конструкция закладывает потенциал для развития;
- самодостаточность – для работы с прибором не требуются другие устройства;
- интуитивность – прибор прост в использовании и не требует специфических навыков;
- компактность – прибор не занимает много места на рабочем столе.

После введения в опытную эксплуатацию системы и выполнения с ее помощью монтажа 250 единиц выпускаемой продукции планово-экономическим отделом предприятия были рассчитаны:

- трудоемкость (Н/Ч);
- эффект на единицу выпускаемой продукции (Н/Ч);
- эффект на партию выпускаемой продукции (Н/Ч);
- экономию в заработной плате в сумме со страховыми взносами;
- расходы на изготовление аппаратной части интеллектуальной системы;
- экономический эффект от внедрения.

Проанализировав таблицу 1, можно увидеть, что после начала использования системы поддержки принятия решений трудоемкость и скорость монтажа для всех изделий снизилась, но не одинаково. Для изделия №1 трудоемкость уменьшилась на 12%, а для изделия № 5 –на 20%. Это объясняется индивидуальными конструктивными особенностями выпускаемой продукции.

Таблица 1

Экономия трудоемкости, заработной платы и страховых взносов

Наименование изделия	Трудоемкость до введения в эксплуатацию (н/ч)	Трудоемкость после введения в эксплуатацию (н/ч)	Эффект на единицу (н/ч)	Общее количество изделий (шт.)	Эффект на общее количество изделий (шт.)	Уменьшение трудоемкости (%)
Изделие №1	111,19	98,20	12,99	203	2637,38	12
Изделие №2	82,23	66,53	15,70	20	314,00	19
Изделие №3	44,80	38,03	6,77	11	74,44	15
Изделие №4	23,36	19,10	4,26	3	12,79	18
Изделие №5	26,58	21,17	5,41	13	70,37	20
Итого:	288,16	243,03	45,13	250	3108,98	

Суммарный эффект для 250 выпущенных изделий составил 3108,97 Н/Ч, если сэкономленные Н/Ч пересчитать в заработную плату со страховыми взносами, то получится 1196326,99 руб.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение системы при производстве электронной аппаратуры представляет собой одно из наиболее важных и перспективных направлений развития промышленности. Внедрение системы имеет перспективы существенно улучшить эффективность, скорость и качество производства, а также оптимизировать процессы и уменьшить вероятность появления проблем, связанных с человеческим фактором.

Библиографические ссылки

7. Ярочкина, Г. В. Радиоэлектронная аппаратура и приборы: монтаж и регулировка 4-е издание. – Москва : Издательский центр «Академия», 2011. – 240 с.
8. Интеллектуальное ядро системы поддержки принятия решений / В. П. Осипов, Т. В. Сивакова, В. А. Судаков и др. // Российская академия наук, Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша. – Москва : Изд-во института, 2018. – 23с.
9. Остроух А. В. Интеллектуальные системы / Красноярск : Научно-инновационный центр, 2015. – 316с. – ISBN 978-5-907208-27-8.
10. Борякина О. О., Шкаликова А. А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений // [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/12/75361> (дата обращения: 13.11.2025).

© Смирнов Е. В., Петров И. В., Луферчик П. В., Комаров А. А., Мартынов К. В., 2026

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В КОНТРОЛЬНО-НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

О. В. Бразговка, Е. В. Сугак

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sugak@mail.ru

Рассматриваются результаты и проблемы внедрения риск-ориентированного подхода в контрольно-надзорной деятельности. Анализ показывает, что в процессе реформирования произошла подмена понятия «риска причинения вреда (ущерба)» на «риск нарушения обязательных требований», а «индикаторы риска», принятые для реализации риск-ориентированного подхода, не соответствуют общепринятым определениям риска и не ориентированы на обеспечение безопасности и приемлемого риска. Для оценки успешности реформы необходимо использовать количественные показатели, указанные в «Паспорте приоритетной программы» – снижение количества смертельных случаев, числа заболеваний и отравлений, числа пострадавших и травмированных, снижение материального ущерба.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, контроль, надзор, индикаторы риска.

Реформирование контрольно-надзорных органов обусловлено необходимостью решения двух основных задач [1]:

- обеспечение безопасности, законных интересов и прав граждан, организаций и государства, поддержки рисков, связанных с хозяйственной деятельностью, на приемлемом уровне (обеспечение интересов общества);
- снижение избыточного административного давления на бизнес, создание благоприятного предпринимательского климата (обеспечение интересов бизнеса).

Одним из ключевых направлений реформы контрольно-надзорной деятельности в Российской Федерации является переход к принципу риск-ориентированного контроля – способу организации надзора и контроля, при котором строгость контрольных мероприятий зависит от категории риска проверяемых субъектов – организации и граждан, осуществляющих предпринимательскую деятельность [2,3]. Этот подход должен был позволить сосредоточить усилия контрольных органов на наиболее значимых и рискованных объектах и областях деятельности, что должно обеспечить «достижение более эффективных результатов при более низких затратах» [2-6].

Ключевыми целями приоритетной программы «Реформа контрольной и надзорной деятельности», принятой в 2016 году, являются снижение административной нагрузки на организации и граждан, осуществляющих предпринимательскую деятельность, повышение качества администрирования контрольно-надзорных функций, а также уменьшение числа смертельных случаев, заболеваний и отравлений, материального ущерба [1]. Срок реализации программы: с декабря 2016 года по 2025 год (включительно).

В паспорте программы указаны конкретные цели реформы и сроки их достижения (таблица 1) [7].

В программу, рассчитанную на 2017-2025 годы, вошли восемь приоритетных проектов:

1. Внедрение риск-ориентированного подхода при осуществлении контрольно-надзорной деятельности.

2. Внедрение системы оценки результативности и эффективности контрольно-надзорной деятельности.
3. Систематизация, сокращение количества и актуализация обязательных требований.
4. Внедрение системы комплексной профилактики нарушений обязательных требований.
5. Внедрение эффективных механизмов кадровой политики в деятельности контрольно-надзорных органов.
6. Внедрение системы предупреждения и профилактики коррупционных проявлений в контрольно-надзорной деятельности.
7. Автоматизация контрольно-надзорной деятельности.
8. Повышение качества реализации контрольно-надзорных полномочий на региональном и муниципальном уровнях.

Таблица 1

Показатели программы «Реформа контрольной и надзорной деятельности»

Показатель	Базовое значение (2015 г.)	Период, год				
		2017	2018	2019	2020	2025
Снижение количества смертельных случаев по контролируемым видам рисков (чел.)	77756 (100%)	73868 (95%)	66093 (85%)	58317 (75%)	54429 (70%)	38878 (50%)
Снижение числа заболеваний и отравлений, пострадавших и травмированных по контролируемым видам рисков (чел.)	291282 (100%)	276718 (95%)	247590 (85%)	218462 (75%)	203897 (70%)	145641 (50%)
Снижение уровня материального ущерба по контролируемым видам рисков (млн руб.), к уровню цен 2015 года	591980 (100%)	562381 (95%)	532782 (90%)	503183 (85%)	473584 (80%)	414386 (70%)
Снижение уровня административной нагрузки на организации и граждан, осуществляющих предпринимательскую деятельность	100%	90%	80%	70%	60%	50%

В конце 2017 года был утвержден приоритетный проект «Внедрение системы оценки результативности и эффективности контрольно-надзорной деятельности» (срок начала и окончания проекта: 27 января 2017 – 31 декабря 2025), целью которого является «ориентация деятельности контрольно-надзорных органов на достижение общественно значимых результатов, направленных на сокращение причиненного ущерба, за счет внедрения соответствующей лучшим международным практикам системы оценки результативности и эффективности контрольно-надзорной деятельности [8].

Некоторые ожидаемые результаты реализации проекта [8]:

- снижение уровня материального ущерба по контролируемым видам рисков: на 10% от уровня 2015 года к концу 2018 года и на 30% к концу 2025 года;
- снижение административной нагрузки на организации и граждан, осуществляющих предпринимательскую и иные виды деятельности: не менее чем на 20% по сравнению с 2016 годом к концу 2018 года и на 50% к концу 2025 года;
- рост индекса качества администрирования контрольно-надзорных функций, включая оптимизацию использования трудовых, материальных и финансовых ресурсов, используемых при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля: в 2 раза к концу 2025 года;
- внедрение системы оценки результатов деятельности контрольно-надзорных органов, основанной на планировании и оценке достигнутых значений утверждённых показателей;
- внедрение механизмов мотивации работников в зависимости от достигнутых результатов работы.

Основными законодательными актами реформы, стали Федеральные законы «Об обязательных требованиях» и «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации», принятые 31 июля 2020 года.

В соответствии с ними основным инструментом реформы стала «регуляторная гильотина» – механизм, который используется для оптимизации законодательства путем отмены устаревших, избыточных и противоречивых нормативных актов [9, 10]. Целью этого инструмента является уменьшение бюрократии, повышение прозрачности и эффективности государственного регулирования, а также создание благоприятной среды для развития бизнеса.

В контексте реформы уже к концу 2020 года были упразднены более 12 тысяч правовых актов (более 90% всех актов, содержащих обязательные требования). С 2021 года установлены новые правила контроля и надзора [11]. В 2021-23 гг. внесены изменения в более 160 законодательных актов, принято около 240 постановлений Правительства РФ и около 350 ведомственных актов, на региональном уровне принято около 2,5 тысяч положений о видах контроля, на муниципальном уровне – более 20 тысяч актов в этой сфере [12].

Утверждены также «Перечень видов государственного контроля (надзора)», включающий 132 вида контроля (надзора), и перечни федеральных органы исполнительной власти, осуществляющие функции по нормативно-правовому регулированию и контрольно-надзорные функции, включающие, соответственно, 21 и 33 органа.

Для каждого отдельного вида контроля (надзора) применяются категории риска либо классы опасности, в зависимости от которых устанавливается периодичность плановых проверок (таблица 2) [13].

Таблица 2.

Категории риска и классы (категории) опасности

Категории риска	Классы (категории) опасности	Особенности проведения плановых проверок	
		для федерального государственного контроля (надзора)	для регионального государственного контроля (надзора)*
Чрезвычайно высокий риск	1 класс	плановая проверка проводится 1 раз в период, установленный положением о виде федерального государственного контроля (надзора) или положением о лицензировании конкретного вида деятельности	плановая проверка проводится 1 раз в год
Высокий риск	2 класс		плановая проверка проводится 1 раз в 2 года
Значительный риск	3 класс		плановая проверка проводится 1 раз в 3 года
Средний риск	4 класс	плановая проверка проводится не чаще 1 раза в период, установленный положением о виде федерального государственного контроля (надзора) или положением о лицензировании конкретного вида деятельности	плановая проверка проводится не чаще 1 раза в 4 года и не реже 1 раза в 5 лет
Умеренный риск	5 класс		плановая проверка проводится не чаще 1 раза в 6 лет и не реже 1 раза в 8 лет
Низкий риск	6 класс	плановые проверки не проводятся**	

Категории риска или классы опасности, а также перечень индикаторов риска нарушения обязательных требований утверждается федеральным органом, осуществляющим функции по нормативно-правовому регулированию.

В 2024 году завершился переход от временных ограничений (моратория) к полноценному внедрению риск-ориентированного подхода, что позволило значительно повысить эффективность контрольных мероприятий при сокращении их количества – общее количество контрольных (надзорных) мероприятий снизилось на 85,4% по сравнению с 2015 годом (рис.1) [14].

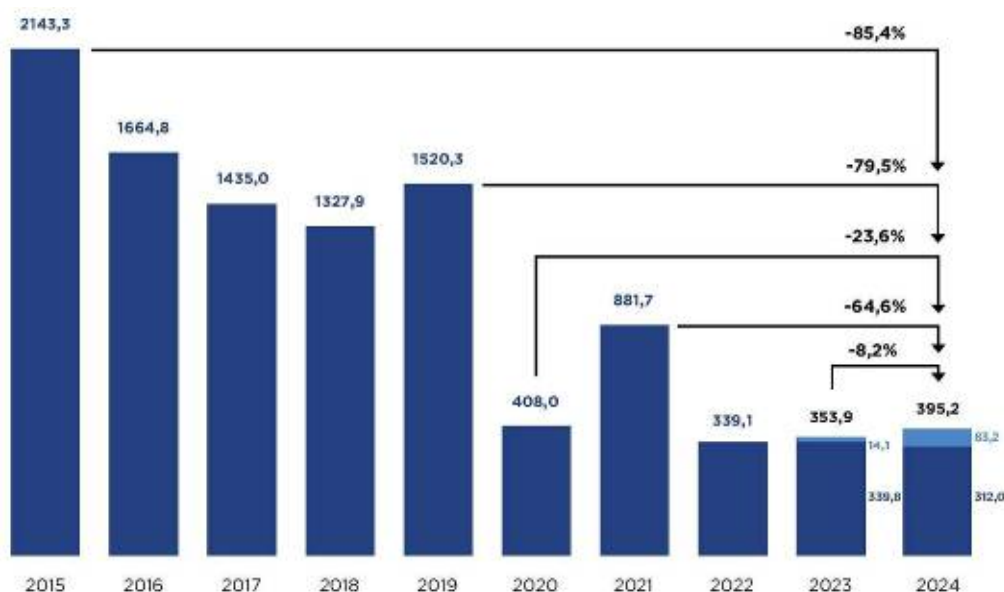


Рис. 1. Количество контрольных (надзорных) мероприятий в 2015-2024 годах (тыс.)

Окончательные итоги реформы еще не подведены. Но ее текущие результаты показывают, что существенного снижения административного давления на бизнес достичь не удалось. Например, по данным Ростехнадзора и сайта «КонсультантПлюс» перечень правил и инструкций по охране труда содержит около 400 документов, норм и правил пожарной безопасности – более 350, федеральных норм и правил промышленной безопасности – около 450, в том числе нормативных правовых актов и административных регламентов Ростехнадзора – более 280.

Сокращения числа контрольно-надзорных органов также не произошло.

Были выявлены и другие проблемы реализации реформы [2-6, 9, 15-18]. Некоторые из них нашли отражение в новой «Концепции совершенствования контрольной (надзорной) деятельности до 2026 года» [19]. План-график реализации новой «Концепции» предусматривает в общей сложности 63 мероприятия до конца 2026 года. Таким образом программа «Реформа контрольной и надзорной деятельности» фактически продлена до конца 2026 года – контрольно-надзорная деятельность будет донастраиваться [17].

В качестве основных направлений «Концепции» заявлены в том числе [17]:

В качестве основных направлений «Концепции» заявлены, в том числе [17]:

- развитие системы управления рисками – предлагается доработать систему категорирования объектов контроля, в том числе с учётом их индивидуальных характеристик, а также предусмотреть возможность снижения категорий риска при соответствии «критериям добросовестности» и проводить плановый контроль только в отношении объектов чрезвычайно высокой и высокой категорий риска, а в отношении объектов иных категорий риска ограничиться профилактическими мероприятиями;

- внедрение сервиса «калькулятор рисков», который позволит в режиме реального времени определять категорию риска для конкретного объекта контроля в рамках вида контроля и возможные факторы, влияющие на ее изменение;

- развитие индикаторов риска в качестве основного инструмента контроля – увеличить количество индикаторов риска (в первую очередь – по массовым видам контроля), а также разработать новые индикаторы риска по наиболее массовым и критичным видам нарушений обязательных требований, в отношении которых еще не установлены индикаторы риска.

В «Сводном доклад о государственном контроле (надзоре), муниципальном контроле в Российской Федерации в 2023 году» в качестве достижения реформы отмечается, что в

2023 году количество индикаторов риска в два раза увеличилось (до 412), а в 2024 году должны были появиться еще порядка 100 новых индикаторов [20].

Однако основная проблема реформы заключается в том, что среди принятых «индикаторов риска» фактически отсутствуют показатели риска причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям. Соответственно, в ежегодных «Сводных докладах о государственном контроле (надзоре)...» за 2021-2024 годы отсутствуют данные о таких рисках и достижении целей реформы в целом [14,20].

Так, например, в перечень индикаторов риска Ростехнадзора в области промышленной безопасности входят [21]:

1. Поступление в территориальный орган Ростехнадзора информации о трёх и более инцидентах, произошедших на опасном производственном объекте в течение одного календарного года, в соответствии с порядком проведения технического расследования причин аварий, установленным согласно пункту 8 статьи 12 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

2. Наличие в акте технического расследования причин аварии сведений о причинах аварии, связанных с нарушением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте, эксплуатируемом юридическим лицом (индивидуальным предпринимателем), в случае если такое юридическое лицо (индивидуальный предприниматель), эксплуатирует опасные производственные объекты III, IV классов опасности, отнесенные к категории опасных производственных объектов по такому же признаку, как и объект, на котором произошла авария (при условии, что в отношении таких объектов не проводились контрольные (надзорные) мероприятия в течение 2 лет до даты аварии).

3. Отсутствие в реестре лицензий сведений о лицензии юридического лица (индивидуального предпринимателя) на эксплуатацию взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектов I, II и III классов опасности в течение 4 месяцев с даты регистрации в государственном реестре опасных производственных объектов таким юридическим лицом (индивидуальным предпринимателем) опасного производственного объекта, деятельность по эксплуатации которого подлежит лицензированию.

4. Наличие сведений об опасном производственном объекте III, IV класса опасности в государственном реестре опасных производственных объектов по истечении 2 лет с даты внесения сведений в реестр заключений экспертизы промышленной безопасности об экспертизе промышленной безопасности, проведенной в отношении документации на консервацию или ликвидацию такого объекта (при условии, что в отношении опасного производственного объекта не проводились контрольные (надзорные) мероприятия в течение 2 лет до даты внесения сведений об экспертизе в реестр заключений экспертизы промышленной безопасности).

5. Исключение сведений о юридическом лице (индивидуальном предпринимателе), эксплуатирующем опасный производственный объект III, IV класса опасности, сведения о котором содержатся в государственном реестре опасных производственных объектов, из единого государственного реестра юридических лиц (единого государственного реестра индивидуальных предпринимателей).

6. Отсутствие сведений о заключении экспертизы промышленной безопасности, содержащем срок дальнейшей безопасной эксплуатации технического устройства, применяемого на опасном производственном объекте III или IV класса опасности, или сведений о выводе из эксплуатации такого технического устройства по истечении года после установленного срока его эксплуатации (при условии, что в течение указанного года в отношении таких объектов не проводились контрольные (надзорные) мероприятия).

7. Отсутствие сведений о заключении экспертизы промышленной безопасности, содержащем вывод о соответствии здания или сооружения на опасном производственном объекте III или IV класса опасности требованиям промышленной безопасности, либо сведений о выводе из эксплуатации такого здания или сооружения по истечении года с

даты внесения в реестр заключений экспертизы промышленной безопасности заключения, содержащего вывод о несоответствии такого здания или сооружения требованиям промышленной безопасности (при условии, что в течение указанного года в отношении объектов не проводились контрольные (надзорные) мероприятия).

8. Факт выдачи экспертом в области промышленной безопасности заведомо ложного заключения экспертизы промышленной безопасности в отношении объекта экспертизы заказчика, при наличии в реестре заключений экспертизы промышленной безопасности сведений о заключении экспертизы промышленной безопасности, содержащем вывод о соответствии объекта экспертизы требованиям промышленной безопасности, выданном указанным экспертом в отношении иных объектов экспертизы этого заказчика в течение двух лет, предшествующих дате привлечения эксперта к административной ответственности (для опасных производственных объектов III или IV класса опасности, при условии, что в отношении таких объектов не проводились контрольные (надзорные) мероприятия после выдачи заключения экспертизы, признанного заведомо ложным).

9. Непоступление в территориальный орган Ростехнадзора от юридического лица (индивидуального предпринимателя), эксплуатирующего опасный производственный объект III или IV класса опасности, заявления о внесении изменений в сведения об указанном объекте, содержащиеся в государственном реестре опасных производственных объектов, по истечении двух лет с даты внесения в реестр заключений экспертизы промышленной безопасности заключения, содержащего вывод о соответствии документации на техническое перевооружение, связанной с модернизацией или заменой технических устройств на указанных объектах, требованиям промышленной безопасности (при условии отсутствия информации о непроведении технического перевооружения на объекте).

10. Осуществление юридическим лицом деятельности по разработке, производству, испытанию, хранению, утилизации пиротехнических изделий IV и V классов на основании лицензии (далее – деятельность, связанная с пиротехническими изделиями) при отсутствии у Ростехнадзора (территориального органа Ростехнадзора) сведений о наличии у этого юридического лица в течение более 30 календарных дней со дня получения такой лицензии (внесения изменений в реестр лицензий) лицензии на эксплуатацию взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектов I, II, и III классов опасности, дающей право осуществления работ в рамках лицензируемого вида деятельности по адресу места осуществления лицензируемого вида деятельности, указанному в реестре лицензий, для деятельности, связанной с пиротехническими изделиями (при условии непоступления в течение указанного срока заявления о предоставлении лицензии на эксплуатацию взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектов I, II, и III классов опасности или внесении изменений в реестр лицензий в связи с дополнением сведениями о месте осуществления такого вида деятельности по адресу, указанному в реестре лицензий для деятельности, связанной с пиротехническими изделиями).

11. Непредставление юридическим лицом (индивидуальным предпринимателем), эксплуатирующим опасный производственный объект, документов, необходимых для его перерегистрации в соответствии со статьей 10 Федерального закона от 4 марта 2013 г. № 22-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», отдельные законодательные акты Российской Федерации и о признании утратившим силу подпункта 114 пункта 1 статьи 333.33 части второй Налогового кодекса Российской Федерации».

12. Непоступление от пользователя недр в территориальный орган Ростехнадзора документов, необходимых для регистрации опасного производственного объекта с типовым наименованием «карьер», «рудник», «рудник с подземным способом разработки», «рудник с открытым способом разработки (карьер)», «шахта угольная», «шахта сланцевая», «разрез угольный», «разрез сланцевый», по истечении 6 месяцев с даты согласования технического проекта разработки месторождения полезных ископаемых в соответ-

ствии со статьей 23.2 Закона Российской Федерации от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 «О недрах» (при условии, что в указанный период в отношении пользователя недр (объектов) не проводились контрольные (надзорные) мероприятия и обязательные профилактические визиты).

В целом с 2021 года на федеральном уровне было утверждено около 50 перечней индикаторов риска нарушения обязательных требований по видам контроля. К концу 2023 года общее количество индикаторов риска достигло до 412 [14].

Однако среди принятых индикаторов риска отсутствуют показатели, действительно характеризующие риск причинения вреда (ущерба) – вероятность реализации негативных сценариев, ущерб или последствия для жизни и здоровья людей, окружающей среды. То есть индикаторы риска, принятые для реализации риск-ориентированного подхода, не соответствуют нормативно установленным или общепринятым определениям риска и не ориентированы на обеспечение приемлемого (допустимого) риска.

Таким образом в процессе реформирования произошла подмена понятия «риска причинения вреда (ущерба)» на «риск нарушения обязательных требований» [3, 4, 6].

Для контроля реализации реформы и риск-ориентированного подхода необходимо разработать систему практически значимых индикаторов риска, непосредственно связанных с определением риска и социально значимыми показателями программы (таблица 1) [3, 4, 6]. Для их оценки можно использовать стандартные и научно обоснованные методы и технологии оценки и прогнозирования рисков, в том числе – с использованием информационных технологий и систем искусственного интеллекта [22-25].

Для оценки успешности реформы в целом необходимо использовать количественные показатели, указанные в «Паспорте приоритетной программы»: снижение ущерба – количества смертельных случаев, числа заболеваний и отравлений, числа пострадавших и травмированных, снижение уровня материального ущерба (см. табл. 1).

Библиографические ссылки

1. Добролюбова Е. И. Международный опыт оценки результативности государственного контроля в сфере охраны труда. – Вопросы государственного и муниципального управления, 2016, № 2, с.96–110.
2. Агамагомедова С. А. Риск-ориентированный подход при осуществлении контрольно-надзорной деятельности: теоретическое обоснование и проблемы применения. – Сибирское юридическое обозрение, 2021, т.18, № 4, с.460–470.
3. Сугак Е. В. Проблемы нормативно-правового обеспечения безопасности. *Russian Studies in Law and Politics*, 2024, т. 8, № 1, с. 4–34.
4. Сугак Е. В. Нормативное обеспечение «риск-ориентированного подхода» в государственном регулировании техносферной безопасности. – Решетневские чтения. Мат. XXVIII Междунар. научно-практ. конференции. В 2-х ч. – Красноярск, 2024, Ч. 1, с. 849–853.
5. Газиев Э. А., Азизова Е.А. Риск-ориентированный подход в контрольно-надзорной деятельности. – Вестник евразийской науки, 2025, т.17, № 1.
6. Сугак Е. В. Реформа контрольно-надзорной деятельности. – Решетневские чтения: Мат. XXIX Межд. научно-практ. конференции. В 2-х ч. – Красноярск, 2025, ч.1, с.1213-1216.
7. Паспорт приоритетной программы «Реформа контрольной и надзорной деятельности». Утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам (протокол № 12 от 21.12.2016, ред. от 30.05.2017).
8. Паспорт приоритетного проекта «Внедрение системы оценки результативности и эффективности контрольно-надзорной деятельности». Утв. протоколом заседания проектного комитета № 78(14) от 20.12.2017.

9. Кнутов А. В. и др. «Регуляторная гильотина» в России и ее количественные результаты. – *Право*, 2022, т. 15, № 2, с. 4–27.
10. Сугак Е. В. «Регуляторная гильотина» техносферной безопасности. Решетневские чтения. Мат. XXVII Междунар. научно-практ. конференции. В 2-х ч. – Красноярск, 2023, ч. 1, с. 759–761.
11. Липунцова А. В. Проблемы и перспективы реформирования государственного контроля в Российской Федерации. – *Russian Studies in Law and Politics*, 2023, т. 7, № 2, с. 47–65.
12. Спиридонов А. А. Особенности модели контрольно-надзорной деятельности в рамках развития механизмов государственного управления в России: конституционно-правовой взгляд. – *Lex Russica*, 2023, т. 76, № 1(194), с. 66–72.
13. Категории риска и классы (категории) опасности. Утв. постановлением Правительства Российской Федерации № 806 от 17.08.2016 (ред. от 28.09.2022).
14. Сводный доклад о государственном контроле (надзоре), муниципальном контроле в Российской Федерации за 2024 год. – М.: Министерство экономического развития Российской Федерации, 2025. – 175 с.
15. Масалаб А. Ф. Проблемы развития государственного контроля и надзора в контексте реформы законодательства. *Правоприменение*, 2020, Т. 4, № 4, С. 94–101.
16. Боронина Л. Н., Ольховикова С. В. Реформа контрольно-надзорной деятельности в России: анализ процесса и возникающие проблемы. – *Общество: политика, экономика, право*, 2024, № 9, с. 131–140.
17. Минина А.А. и др. Контрольно-надзорная деятельность в Российской Федерации: новые вызовы и перспективы. – *Право и государство: теория и практика*, 2024, № 6(234), с. 237-240.
18. Барышникова С. М. Применение риск-ориентированного подхода в контрольно-надзорной деятельности. – *Молодой ученый*, 2025, № 20(571), с. 387-389.
19. Концепция совершенствования контрольной (надзорной) деятельности до 2026 года. Утв. распоряжением Правительства РФ № 3745-р от 21.12.2023.
20. Сводный доклад о государственном контроле (надзоре), муниципальном контроле в Российской Федерации в 2023 году. – М.: Министерство экономического развития Российской Федерации, 2024. – 170 с.
21. Перечень индикаторов риска нарушения обязательных требований, используемых при осуществлении Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору и её территориальными органами федерального государственного надзора в области промышленной безопасности. Утв. приказом Ростехнадзора № 397 от 23.11.2021 (ред. от 22.09.2025).
22. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н., Кузнецов Е. В. Вычислительные и информационные технологии анализа и оценки социально-экологических рисков. – *Экология и промышленность России*, 2008, № 8, с. 24–29.
23. Сугак Е. В., Кузнецов Е. В., Назаров А. Г. Информационные технологии оценки экологической безопасности. – *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2009, т. 18, № 12, с. 39–45.
24. Сугак Е. В. Современные методы оценки экологических рисков. – *European Social Science Journal*, 2014, № 5(44), т. 2, с. 427–433.
25. Потылицына Е. Н., Липинский Л. В., Сугак Е. В. Использование искусственных нейронных сетей для решения прикладных экологических задач. – *Современные проблемы науки и образования*, 2013, № 4, с. 1–8.

© Бразговка О. В., Сугак Е. В., 2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Е. В. Шестова, Т. С. Бондаренко
Научный руководитель – В.Ю Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: schestowa.alena2015@yandex.ru

Статья посвящена сравнительному изучению контроля и диагностики молекулярных методов неразрушающего контроля в ракетно-космической технике. Рассматриваются теоретические основы методов, их применимость к различным типам материалов, надежность, чувствительность, точность, а также практические аспекты использования в промышленности и научных исследованиях.

Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, молекулярный метод, неразрушающий контроль, глубина проникновения индикатора, жидкостный контроль, газовый контроль, ракетно-космическая техника, диагностика дефектов, надежность.

Неразрушающий контроль (НК) методов играет ключевую роль в современной науке и промышленности, обеспечивая точное и безопасное исследование свойств веществ без их повреждения. Это особенно важно для ракетно-космической техники (РКТ). Надёжность и безопасность изделий РКТ напрямую зависят от качества контроля материалов, узлов и систем на всех этапах жизненного цикла – от изготовления до эксплуатации. Особое значение имеют методы неразрушающего контроля (НК), позволяющие получать информацию о состоянии объекта без нарушения его целостности и работоспособности.

Среди большого числа методов НК особое место занимают молекулярные методы, основанные на регистрации физико-химических процессов на уровне молекул и атомов. Данные методы отличаются высокой чувствительностью и применяются для контроля герметичности, выявления микродефектов, анализа чистоты рабочих сред и диагностики газовой выделений.

Надежность ракетно-космической техники (РКТ) является одним из критических факторов успеха космических миссий и безопасности эксплуатации. Конструкции РКТ подвергаются экстремальным нагрузкам: температурным, механическим, вибрационным, что создает предпосылки для возникновения скрытых дефектов, таких как микротрещины, поры и расслоения. Раннее обнаружение таких дефектов напрямую влияет на предотвращение катастрофических отказов. В этом контексте молекулярные методы неразрушающего контроля выступают незаменимым инструментом диагностики на этапах производства, сборки и обслуживания.

Особую актуальность приобретает способность молекулярных методов выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты в композитных материалах, теплозащитных покрытиях и сварных соединениях, широко применяемых в РКТ. Жидкостный и газовый подходы, основанные на капиллярном проникновении индикаторных веществ, позволяют визуализировать нарушения целостности без разрушения объекта. Однако отсутствие систематизированных данных по сравнительной эффективности этих методов затрудняет обоснованный выбор для конкретных задач отрасли.

Целью данной работы является систематизация и сравнительный анализ основных молекулярных методов неразрушающего контроля, применяемых в ракетно-космической технике:

1. Сравнение жидкостного и газового методов по первичному информативному параметру – глубине проникновения индикатора.

2. Сравнительный анализ спектра методов (цветной, люминесцентный, масс-спектрометрический, пузырьковый, манометрический, химический) по способу получения первичной информации.

Объект исследования: процессы неразрушающего контроля в ракетно-космической технике.

Предмет исследования: зависимость информативности и диагностических возможностей молекулярных методов от глубины проникновения индикатора и способа его детекции.

Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций по обоснованному выбору метода контроля для различных материалов и узлов РКТ (камеры сгорания, топливные баки, корпусные элементы, сварные швы), что позволит повысить надежность и снизить аварийность.

Теоретические основы молекулярных методов НК.

Молекулярные методы НК основаны на явлении капиллярного проникновения индикаторных веществ в дефекты контролируемых объектов. Физической основой методов является способность жидкостей и газов проникать в поверхностные и сквозные несплошности материалов под действием капиллярных сил и диффузии.

- Жидкостный метод использует специальные жидкости (пенетранты) с высокой смачивающей способностью и низким поверхностным натяжением. Метод эффективен для выявления поверхностных дефектов шириной от 1 мкм, особенно в непористых материалах.

- Газовый метод основан на диффузии газообразных индикаторов (например, гелия) в дефекты. Скорость диффузии описывается законами Фика и зависит от молекулярной массы газа, давления и температуры. Газовый метод обладает высокой чувствительностью и способен выявлять субмикронные дефекты, а также контролировать герметичность сложных систем.

Ключевое различие между методами заключается в агрегатном состоянии индикатора и механизме его проникновения, что определяет их диагностические возможности.

Сравнительный анализ по глубине проникновения индикатора.

Глубина проникновения индикатора является первичным информативным параметром, определяющим способность метода выявлять скрытые дефекты. Проведенный анализ показал следующие результаты:

– Газовый метод обеспечивает более глубокое проникновение благодаря малой вязкости и высокой диффузионной способности газов. Он эффективен для диагностики внутренних дефектов в пористых материалах, многослойных структурах и герметичных системах.

– Жидкостный метод демонстрирует высокую эффективность при выявлении поверхностных и приповерхностных дефектов. Его преимущество заключается в высокой контрастности индикаторного следа и простоте визуализации.

На глубину проникновения влияют следующие факторы:

- Вязкость индикатора (для жидкостного метода).
- Молекулярная масса и коэффициент диффузии (для газового метода).
- Давление и температура.
- Пористость и шероховатость материала.

Экспериментальные данные и математическое моделирование подтвердили, что газовый метод превосходит жидкостный по глубине проникновения в большинстве материалов, используемых в РКТ.

Сравнение молекулярных методов НК по способу получения первичной информации: цветной, люминесцентный, масс-спектрометрический, пузырьковый, манометрический, химический.

Молекулярные методы неразрушающего контроля представляют собой совокупность физических и физико-химических способов диагностики, основанных на анализе поведения молекул, атомов и элементарных частиц вблизи дефектов или в зонах нарушения сплошности материала. В отличие от классических методов НК, ориентированных на макроскопические неоднородности, молекулярные методы позволяют выявлять дефекты на ранних стадиях их формирования.

Ключевой особенностью молекулярных методов является использование первичных информативных параметров, связанных с молекулярными процессами: диффузией, капиллярным проникновением, химическими реакциями, люминесценцией и изменением давления. Эти параметры обладают высокой чувствительностью к микродефектам, что особенно важно для изделий ракетно-космической техники.

Каждая группа методов ориентирована на решение определённого класса диагностических задач и характеризуется собственным набором ограничений и преимуществ. В практике РКТ они, как правило, применяются не изолированно, а в составе комплексных программ контроля.

- Цветной метод относится к числу простейших молекулярных методов неразрушающего контроля и основан на регистрации изменения цвета или интенсивности окрашивания анализируемой среды. Измеряемым параметром является оптическая плотность, определяемая спектрофотометрическими или колориметрическими приборами.

В ракетно-космической технике цветной метод применяется, прежде всего, для контроля химической чистоты рабочих жидкостей: топлива, окислителей, гидравлических и теплоносных сред. Даже незначительные отклонения в составе этих веществ могут приводить к ускоренному износу элементов двигательных установок и отказам систем.

Метод характеризуется сравнительно невысокой чувствительностью, однако его достоинством является возможность быстрого экспресс-контроля без сложной подготовки образцов. Аппаратура компактна и относительно недорога, что делает метод удобным для регламентных проверок в лабораторных условиях.

Ограничением цветного метода является влияние посторонних примесей и фона среды, а также зависимость результатов от условий освещения и калибровки приборов.

- Люминесцентный метод основан на способности ряда веществ испускать электромагнитное излучение при возбуждении внешним источником энергии. В качестве индикаторов используются специальные люминофоры, проникающие в дефекты и проявляющие их при ультрафиолетовом облучении.

В ракетно-космической технике данный метод широко применяется для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов сварных соединений, литых деталей и композитных конструкций. Его высокая чувствительность позволяет обнаруживать трещины с раскрытием порядка единиц микрометров.

Ключевым преимуществом люминесцентного метода является высокая контрастность дефектов на фоне поверхности, что значительно снижает вероятность ошибок оператора. Метод хорошо поддается автоматизации и может использоваться в условиях серийного производства.

К недостаткам относятся требования к стабильности источников УФ-излучения и необходимость строгого соблюдения технологического регламента контроля.

- Масс-спектрометрический метод является наиболее высокочувствительным среди молекулярных методов неразрушающего контроля. Его принцип действия основан на ионизации молекул пробного газа и последующем анализе ионов по массово-зарядовому отношению в электромагнитных полях.

В ракетно-космической технике данный метод реализуется преимущественно в форме гелиевого течеискания. Гелий используется в качестве индикаторного газа благодаря малому размеру молекул, химической инертности и низкому фоновому содержанию в атмосфере.

Метод позволяет обнаруживать утечки с интенсивностью до 10^{-12} Па·м³/с, что делает его незаменимым при контроле герметичности топливных баков, магистралей, клапанов и камер сгорания. Именно масс-спектрометрический контроль является обязательным этапом при приёмке изделий пилотируемой космонавтики.

К ограничениям метода относятся высокая стоимость оборудования, сложность эксплуатации и необходимость высококвалифицированного персонала.

- Пузырьковый метод основан на визуальной регистрации выхода газа через дефекты при погружении контролируемого изделия в жидкость. Появление пузырьков указывает на наличие сквозных несплошностей. Метод прост в реализации и не требует сложной аппаратуры.

- Манометрический метод заключается в контроле изменения давления в замкнутом объёме изделия за заданный интервал времени. Снижение давления свидетельствует о наличии утечки.

Оба метода широко применяются на ранних этапах испытаний и в качестве вспомогательных средств контроля. Их достоинствами являются наглядность и низкая стоимость. Однако чувствительность пузырькового и манометрического методов существенно ниже по сравнению с масс-спектрометрическим контролем, что ограничивает их применение при диагностике ответственных узлов РКТ.

- Химический метод молекулярного неразрушающего контроля основан на использовании специфических химических реакций, приводящих к изменению цвета, электропроводности или другого физического параметра при наличии дефекта или утечки.

В ракетно-космической технике данный метод применяется для обнаружения токсичных и агрессивных веществ, таких как аммиак, оксиды азота и продукты разложения топлива. Контроль осуществляется с использованием индикаторных трубок, газоанализаторов и химических сенсоров.

Основным достоинством химического метода является возможность оперативного контроля газовой безопасности и состояния атмосферы в герметичных отсеках. Ограничением является селективность реакций и возможность ложных срабатываний при наличии посторонних веществ.

Сравнение рассмотренных методов показывает, что ни один из них не является универсальным. Наиболее точным и надёжным является масс-спектрометрический метод, в то время как цветной и химический методы наиболее доступны и экономичны. Пузырьковый и манометрический методы целесообразны для предварительного контроля.

Итог:

1. Молекулярные методы неразрушающего контроля являются инструментом обеспечения надёжности изделий ракетно-космической техники.

2. Масс-спектрометрический метод обладает наивысшей чувствительностью и является базовым стандартом контроля герметичности ответственных узлов РКТ.

3. Люминесцентный метод эффективно дополняет другие способы контроля при выявлении поверхностных и приповерхностных дефектов.

4. Цветной и химический методы целесообразны для контроля чистоты рабочих сред и обеспечения газовой безопасности.

5. Пузырьковый и манометрический методы рационально использовать на предварительных этапах испытаний и для вспомогательной диагностики.

6. Наиболее эффективным является комплексный подход, предусматривающий сочетание нескольких методов с учётом конструкции изделия и требований к точности контроля.

Комплексное применение нескольких методов позволяет обеспечить высокий уровень надёжности контроля изделий ракетно-космической техники.

Области применения молекулярных методов в РКТ:

1. Контроль герметичности топливных баков, двигателей, кабин (газовый метод, масс-спектрометрический течеискатель).

2. Диагностика композитных материалов (обтекатели, панели) – преимущественно жидкостный метод.

3. Контроль теплозащитных покрытий и керамических материалов – комбинированное применение методов.

На основании проведенного анализа сформулированы практические рекомендации:

1. Газовый метод следует применять для:

– Контроля герметичности сложных систем.

– Диагностики пористых материалов (керамика, углепластики).

– Выявления глубоких и скрытых дефектов.

2. Жидкостный метод целесообразно использовать для:

– Поверхностного контроля металлических соединений.

– Визуализации микротрещин в композитах.

– Быстрого контроля на этапах сборки.

3. Гибридные подходы (сочетание методов) рекомендуется применять для ответственных узлов, где требуется комплексная диагностика.

Проведенный сравнительный анализ подтвердил существенное преимущество газового молекулярного метода по глубине проникновения индикатора, что делает его предпочтительным для диагностики скрытых дефектов в материалах РКТ. Жидкостный метод остается эффективным инструментом для поверхностного контроля и визуализации микротрещин.

Результаты исследования позволяют оптимизировать выбор метода контроля в зависимости от типа материалов, конструктивных особенностей и эксплуатационных условий. Внедрение рекомендаций по применению газового и жидкостного методов в производственные процессы РКТ способно повысить надежность диагностики на 20–30%, снизить риски аварийных ситуаций и соответствовать международным стандартам качества и безопасности.

Перспективы развития связаны с автоматизацией контроля, использованием наночастиц в индикаторных составах и созданием интегрированных систем мониторинга, что позволит вывести диагностику РКТ на новый уровень точности и эффективности.

Проведённый анализ подтверждает, что грамотный выбор и комбинирование молекулярных методов неразрушающего контроля позволяет существенно повысить надёжность и безопасность ракетно-космических систем, а также снизить риски отказов на этапах испытаний и эксплуатации.

Газовый метод имеет фундаментальное преимущество перед жидкостным при контроле пористых материалов и выявлении глубоко расположенных дефектов.

Масс-спектрометрический контроль является основным и обязательным для испытаний на герметичность в РКТ, обеспечивая непревзойденную чувствительность.

Люминесцентный метод сохраняет статус наиболее чувствительного и распространенного метода для выявления поверхностных микродефектов в сварных швах и на ответственных поверхностях.

Оптимальная стратегия контроля в РКТ основана на комплексном применении методов: люминесцентный – на этапах производства и ремонта, масс-спектрометрический – на финальных испытаниях герметичности, вспомогательные методы – для оперативного предварительного контроля.

Дальнейшее развитие молекулярных методов НК связано с повышением их чувствительности, автоматизацией, созданием гибридных технологий и интеграцией в системы

цифрового мониторинга состояния изделий, что позволит выйти на новый уровень надежности и безопасности ракетно-космической техники.

Библиографические ссылки

1. Андреев В. И. Неразрушающий контроль в ракетно-космической технике. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 284 с. Бочкарева С.В., Сальникова А.Ф., Галиновский А.Л. Математический алгоритм оценки акустической проводимости волнового фронта для верификации диагностической модели при анализе дефектов в полимерном композитном материале // Механика композитных материалов. – 2021. – №6. – С. 1079–1092.
2. Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Контрольные образцы для капиллярной дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2024. – №2. – С. 44–47.
3. Кудрявцев В.В., Бочкарев С.В. Анализ перспективных методов контроля качества изделий из композиционных материалов // Современные проблемы теории машин. – 2022. – №13. – С. 88–93.
4. Лобанова И.С., Мещеряков В.А., Калинин Н.П. и др. Моделирование проникновения жидкостей в несплошности изделий из неметаллических материалов // Ползуновский вестник. – 2016. – №4. – С. 103–107.
5. Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И. Научно-технические технологии изготовления деталей из неметаллических материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №9. – С. 40–48.
6. Маслов Б.Г. Неразрушающий контроль сварных соединений и изделий в машиностроении. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 272 с.
7. Михайлов А.В., Василенко О.Н. Отчет о проведении XXXIII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» // Территория NDT. – Екатеринбург, 2022. – С. 4–7.
8. Никитин П.В. Гетерогенные потоки в инновационных технологиях. – Москва: Янус-К, 2009.
9. Прохоренко П.П., Мигун Н.П. Капиллярный контроль качества при упрочнении и восстановлении деталей машин // Вестник полесского государственного университета. Серия В. – 2005. – №12. – С. 148–151.
10. Скоробогатько Д.С., Головкин А.Н., Кудинов И.И. и др. К вопросу об экотоксичности и эффективности различных классов промышленных неионогенных ПАВ, используемых при очистке металлических поверхностей в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2021. – №4. – С. 98–106.
11. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Физические основы неразрушающего контроля изоляции обмоток электроприводов горношахтного и нефтепромыслового оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – №2. – С. 102–116.

© Шестова Е. В., Бондаренко Т. С., 2026

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

И. Д. Сотников, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
sotnikov.ilya.2002@gmail.com

Аннотация. В статье исследуется проблема обеспечения надежности жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) через применение современных методов акустического неразрушающего контроля (НК) в контуре испытаний. Выполнен сравнительный анализ методов акустического НК, их технических характеристик, преимуществ, ограничений и целесообразности применения для диагностики ключевых узлов двигателя (камеры сгорания, турбонасосного агрегата, силовых элементов) на различных этапах испытаний.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, испытания, надежность, неразрушающий контроль, акустические методы, ультразвуковая дефектоскопия, акустическая эмиссия, комплексная диагностика.

Надежность жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) является абсолютным приоритетом любой космической программы. Экстремальные условия работы (температуры до 3000 К, давления в десятки МПа, высокочастотные вибрации, агрессивные среды) в сочетании с невозможностью ремонта в полете предъявляют беспрецедентные требования к качеству изготовления и ресурсу каждого узла [1]. Система наземных испытаний выступает ключевым барьером на пути потенциальных отказов, призванным не только подтвердить заявленные характеристики, но и выявить скрытые дефекты, способные к развитию в эксплуатации.

Традиционные методы контроля качества изготовления при обнаружении недопустимых отклонений параметров изделий от требуемых значений в конструкторской документации обязывают устранения недостатков или браковки данного экземпляра. В этом контексте методы акустического неразрушающего контроля (НК) приобретают стратегическое значение. Они предоставляют уникальную возможность получать информацию о целостности материала и характере развитии повреждений в реальном времени, без нарушения работоспособности объекта [2]. Акустические методы трансформируются из вспомогательного инструмента в системообразующий элемент интеллектуального испытательного комплекса.

ЖРД представляет собой сложную энергетическую машину, основными агрегатами которой являются:

- камера двигателя – основной узел, где происходят смесеобразование, горение топлива и разгон продуктов сгорания. Стенка камеры выполняется, как правило, в виде двухслойной конструкции с внутренним охлаждением.
- турбонасосный агрегат (ТНА) – обеспечивает подачу компонентов топлива под высоким давлением. Характеризуется прецизионной механикой, работающей при высоких скоростях вращения.
- газогенератор – создает рабочий газ для привода турбины ТНА.
- система регулирования и трубопроводов – управляет потоками компонентов топлива высокого давления.

- силовая рама – воспринимает и передает тягу на конструкцию ракеты.

Работа ЖРД сопровождается комплексом экстремальных нагрузок, формирующих специфические механизмы повреждений:

- термомеханические нагрузки: Локальный нагрев до 3000–4000 К создает огромные температурные градиенты в стенках камеры, приводя к циклическим термическим напряжениям и усталости;

- высокие статические и динамические давления: Давление в камере сгорания (до 30 МПа и выше) и в магистралях ТНА вызывает значительные механические напряжения;

- вибрационные и ударные нагрузки: Пульсации горения, вращение роторов ТНА (тысячи об/мин), гидроудары при запуске/остановке генерируют широкополосный вибрационный спектр, являющийся основной причиной усталостного разрушения;

- воздействие агрессивных сред: Компоненты топлива (кислород, керосин, водород) и продукты сгорания обладают высокой коррозионной и эрозионной активностью.

Исходя из природы нагрузок, для ЖРД характерны следующие виды дефектов:

- трещины (усталостные, термические, от коррозии под напряжением) – наиболее опасный тип, особенно в сварных швах камеры, лопатках турбин, элементах арматуры;

- прогары и эрозия стенок камеры сгорания и сопла – связаны с нарушением теплового режима;

- дефекты соединений: непровары, поры, раковины в сварных и паяных швах, выступающие концентраторами напряжения;

- расслоения и отслоения теплозащитных и демпфирующих покрытий.

Для обеспечения качества изготавливаемых изделий применяются различные методы контроля. Одним из наиболее широко применяемых методов технологического контроля выступают акустические методы.

Физической основой акустических методов является генерация, распространение и регистрация упругих волн в твердых телах. Любая неоднородность (дефект) вызывает отражение, рассеяние, изменение скорости или моды волны.

Ключевые акустические методы и их особенности:

Ультразвуковая дефектоскопия. Варианты метода основаны на анализе сигналов, отраженных от внутренних дефектов.

Технология проверки определена ГОСТ Р 55724-2013. Сегодня в промышленности используют разные варианты дефектоскопии ультразвуком (рис. 1):

- Теневой способ. Он базируется на применении одновременно двух преобразующих устройств: генератор и приемник фиксируют перпендикулярно исследуемой плоскости диагностируемого изделия. Первый запускает волны на стык, второе устройство их принимает. Если в потоке ультразвуковых колебаний между аппаратами возникает глухой участок, это свидетельствует о наличии между ними зоны с другой средой. Так подтверждается неисправность неразъемного соединения, полученного в процессе сварки.

- Эхо-импульсный вариант. Базируется на отражении участков с дефектами. Для его проведения достаточно одного преобразователя. Ультразвуковой дефектоскоп одновременно запускает и принимает сигналы. Изъяны отсутствуют, если колебания проходят через толщу металла сварочного шва и не отображаются на табло. Отражение их от стенок области, на которой подозреваются дефекты, подтверждает наличие недостатков. Если ультразвук проникает сквозь толщу металла, не отражаясь на приборе, значит, повреждений внутри шва нет.

- Эхо-зеркальный способ. Актуален для изучения вертикальных дефектов (трещин). Излучатель и приемник устанавливаются под углом 90 градусов по одну сторону от исследуемого объекта. Попадая на участки с повреждениями, волны, которые направлены к шву, отражаются, и далее их фиксирует приемник.

- Зеркально-теневой. УЗК метод представляет собой взаимодействие зеркального и теневого вариантов. Аппараты размещают с одного края от исследуемого образования. Косые волны, запущенные генератором, отражаются от металла и принимаются приемником. Колебания видоизменяются, если на пути потока встречаются изъяны шва в виде глухой зоны.
- Дельта-контроль. Излучение волн проходит внутрь сварного стыка. В основе техники – переизлучение изъяном направленных волн внутрь соединения. Проведение УЗК этим способом технически сложно: требуется скрупулезная настройка аппаратуры для фиксации всех подкатегорий волн (продольных, зеркальных, поперечных и др.). Вариант не подходит для исследования шва шириною более 1,5 см.

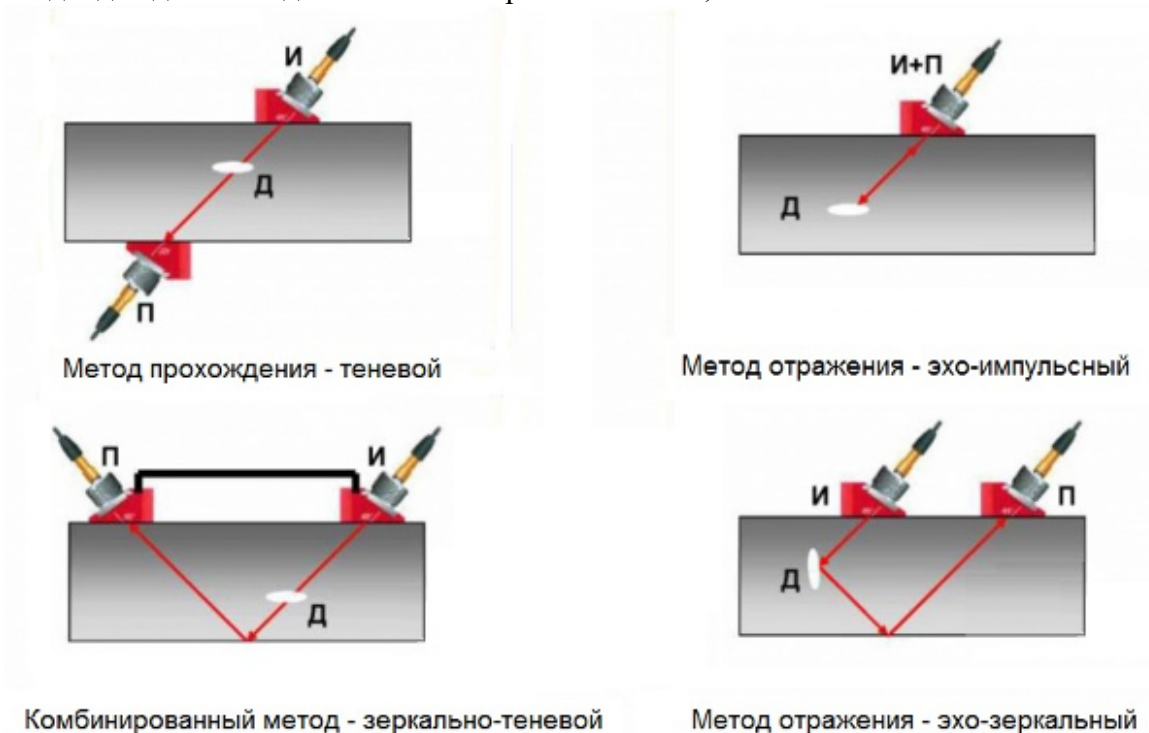


Рис. 1. Методы и способы ультразвуковой дефектоскопии
И – источник; П – приемник; Д – дефект

Для выявления скрытых повреждений (пустот, химически неоднородной структуры) с помощью ультразвуковых колебаний специалисты чаще всего применяют теневой и эхо-импульсный методы. Они позволяют организовать эффективную профилактику аварийных ситуаций в инженерных коммуникациях. Исследования выявляют брак, который может привести к разгерметизации стыка.

Плюсы ультразвуковой дефектоскопии:

- проверяемую деталь не требуется повреждать или разрушать;
- работа проводится очень быстро и недорого стоит;
- в сравнении с некоторыми другими видами дефектоскопии, например, рентгеновской не представляет опасности для человека;
- возможность проводить контроль как металлических, так и неметаллических образцов;
- благодаря высокой мобильности ультразвуковые дефектоскопы для проверки необходимого объекта можно доставить практически в любое место.

Недостатки ультразвукового контроля:

- требуется тщательная подготовка поверхности проверяемого изделия, чтобы между ней и прибором не было даже малейшего воздушного зазора;

- во многих случаях этот метод контроля не позволяет получить информацию об истинных размерах дефекта;
- большие трудности представляет контроль изделий сложной формы и малых размеров.

Для ЖРД критически важны модификации с фазированными антенными решетками, позволяющие строить 2D/3D-изображения дефектов в сложнопрофильных сварных швах [3].

Акустико-эмиссионный метод (АЭ): Регистрирует высокочастотные волны, спонтанно излучаемые материалом в процессе его пластической деформации и роста трещин. Является единственным методом динамического мониторинга разрушения в реальном времени.

Это пассивный метод неразрушающего контроля. Главная цель его применения – выявление трещин, разломов, расслоений, коррозионных процессов. При этом он помогает находить не статические, а развивающиеся дефекты. Именно они являются наиболее опасными, так как грозят серьезными неприятностями в самом ближайшем будущем.

В отличие от других методов НК, контроль акустической эмиссией не требует применения каких-либо внешних источников сигнала. Он предполагает улавливание упругих колебаний, генерируемых самим проверяемым объектом, благодаря чему обеспечивается высокая точность обнаружения деформаций. Приборы включают в себя два преобразователя и комплект устройств для получения информации с датчиков, ее обработки и вывода на периферийное оборудование, каждый из которых регистрирует время улавливания сигнала.

Характерными особенностями метода АЭ контроля, определяющими его возможности и область применения, являются следующие:

- метод АЭ-контроля обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;
- метод АЭ-контроля обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам – позволяет выявить в рабочих условиях приращение трещины порядка долей мм. Предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по теоретическим оценкам составляет порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм;
- свойство интегральности метода АЭ-контроля обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ-контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта;
- метод АЭ позволяет проводить контроль различных технологических процессов и процессов изменения свойств и состояния материалов;
- положение и ориентация объекта не влияет на выявляемость дефектов;
- метод АЭ имеет меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой материалов;
- особенностью метода АЭ, ограничивающей его применение, является в ряде случаев трудность выделения сигналов АЭ из помех. Это объясняется тем, что сигналы АЭ являются шумоподобными, поскольку АЭ есть стохастический импульсный процесс. Поэтому, когда сигналы АЭ малы по амплитуде, выделение полезного сигнала из помех представляет собой сложную задачу.

При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и темп их генерации резко увеличивается, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого источника АЭ.

Преимущества метода:

- Метод имеет значительно меньшие ограничения, связанные со свойствами и структурой объекта, по сравнению с другими методами НК.

- Высокая чувствительность метода к растущим и развивающимся дефектам позволяет выявлять их на ранней стадии, оценивать степень опасности и скорость их развития.

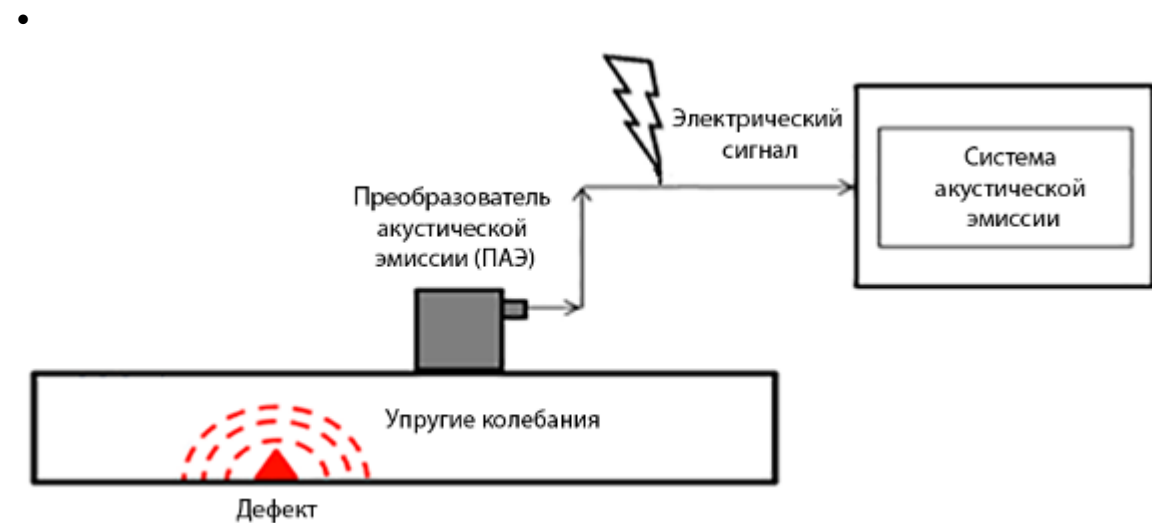


Рис. 2. Схема применения метода АЭ

Метод АЭ может быть использован для контроля объектов при их изготовлении, в процессе приемочных испытаний, при периодических технических обследованиях, в процессе эксплуатации.

Метод АЭ рекомендуется использовать для контроля объектов при сочетании с другими методами неразрушающего контроля.

Импедансный метод: Анализирует изменение механического импеданса (сопротивления колебаниям) пьезоэлемента, связанного с объектом. Обладает высокой чувствительностью к расслоениям, непрочностям, изменению жесткости соединений.

Резонансный метод: Определяет изменение резонансных частот объекта. Эффективен для точного измерения толщины тонкостенных элементов (трубопроводы, участки камеры) и контроля эрозии.

Целевое применение акустических методов для узлов ЖРД:

- Камера сгорания/сопло: Комбинация АЭ (мониторинг термической усталости в реальном времени) и РАУТ (детальная оценка выявленных трещин после остановки).
- Турбонасосный агрегат (ТНА): АЭ для диагностики подшипников и кавитации в насосах; УЗ-методы для контроля лопаток и роторов на предмет усталостных трещин.
- Силовые элементы и сварные швы: для послемонтажного и послеиспытательного контроля качества швов.
- Теплозащитные покрытия и слоистые структуры лучше исследовать импедансным методом для контроля адгезии и целостности.

На основе проведенного анализа сформулированы три ключевых принципа построения эффективной системы контроля для испытаний ЖРД:

1. Принцип синергии и последовательности. Отказ от поиска универсального метода в пользу стратегической комбинации:

- АЭ-система выполняет роль «сторожа» в режиме онлайн, круглосуточно отслеживая объект и подавая сигнал при возникновении активных дефектов (рост трещины, утечка).
- УЗ-система (РАУТ) выступает как «эксперт». По команде от АЭ-системы или по регламенту она проводит детальное обследование выявленных «горячих точек» для определения точных размеров, формы и ориентации дефекта.

2. Принцип соответствия этапу жизненного цикла. Выбор методов определяется решаемой задачей:

- Изготовление/ремонт: УЗК, импедансный метод.
- Подготовка к испытаниям (предпусковой контроль): Визуальный осмотр, УЗ-толщинометрия, импедансный контроль покрытий.
- Проведение испытаний: АЭ – основной метод, дополненный вибромониторингом.
- После испытаний: Детальный УЗ-контроль (РАУТ), повторный импедансный метод.

3. Принцип интеграции в контур управления. Данные акустических систем (особенно потоки данных АЭ в реальном времени) должны напрямую поступать в Центр управления испытаниями. Критические события (превышение порога энергии, интенсивный рост счетчиков АЭ) могут быть заложены в алгоритмы для автоматического формирования предупреждений или даже инициирования аварийного прекращения испытаний по критериям безопасности.

Реализация такой комплексной системы, несмотря на высокие первоначальные затраты, экономически целесообразна за счет предотвращения катастрофических отказов, оптимизации межремонтных интервалов и сокращения времени испытательных циклов.

Таким образом, практическая реализация комплексных систем акустической диагностики на испытательных стендах ЖРД является следующим закономерным шагом в эволюции испытательных технологий. Это закладывает основу для создания интеллектуальных испытательных комплексов, способных не только констатировать факт, но и прогнозировать отказ, что в конечном итоге ведет к созданию более безопасных, надежных и экономичных жидкостных ракетных двигателей.

Библиографические ссылки

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования / М.В. Добровольский. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 488 с.
2. Ермолов, И.Н. Акустические методы неразрушающего контроля / И.Н. Ермолов, В.В. Клюев, А.Д. Кокин. – М.: Машиностроение, 2004. – 376 с.
3. Алехин, В.П. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.П. Алехин, В.С. Иванов, И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 2010. – 768 с.
4. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.
5. Ширяев, А.А. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса конструкций / А.А. Ширяев, В.В. Клюев. – М.: Спектр, 2015. – 320 с.

© Сотников И. Д., Журавлев В. Ю., 2026

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕГО КОЛЕСА МАЛОРАСХОДНОГО НАСОСА

В. В. Черненко, Д. В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва,
Российская Федерация, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31
e-mail: 2887722@mail.ru

Аннотация. В статье исследуется влияние конструктивных и режимных параметров на энергоэффективность рабочего колеса малорасходного центробежного нагнетателя. Актуальность работы обусловлена широким применением таких насосов в авиационно-космической технике, нефтехимии и системах терморегулирования, а также недостатком экспериментальных данных, особенно для колёс открытого и полукрытого типа. Разработанная модель позволяет прогнозировать энергетические показатели рабочего колеса на этапе проектирования и может быть использована для создания более эффективных малорасходных насосов

Ключевые слова: малорасходные нагнетатели, энергетические показатели, напор, создаваемое давление, коэффициент влияния конечного числа лопаток

Малорасходные нагнетатели находят широкое применение в разнообразных устройствах авиационной и космической отраслей, нефтехимической промышленности, системах промышленного охлаждения, а также в сфере отопления и водоснабжения. Они функционируют на высоких оборотах (до 20 000 об/мин) как агрегаты, предназначенные для подачи жидких рабочих сред с целью создания сравнительно небольшого давления при значительном объеме перекачиваемой жидкости. [1-3]

Конструкция малорасходных нагнетателей имеет существенные отличия от полно-размерных насосных агрегатов не только в размерах, но и в устройстве ключевых компонентов. Гарантированный срок их службы может достигать нескольких лет, что демонстрируется, например, насосами, входящими в систему жизнеобеспечения орбитальных аппаратов.[3]

В качестве приводов для этих насосов активно применяются электродвигатели и турбинные установки.

Эксплуатационные показатели малорасходных центробежных нагнетателей делают их применение особенно выгодным в сочетании с высокооборотными приводами, что соответствует современным тенденциям развития техники. Многообразие сфер, где необходимы малорасходные центробежные нагнетатели, определяет требования к их длительной и надежной работе с различными по своим физическим свойствам рабочими средами. Это могут быть жидкости с разной температурой и вязкостью, используемые в технологических процессах. Несмотря на то, что в последнее время проведен ряд исследований малорасходных нагнетателей, экспериментальные данные по центробежным малорасходным агрегатам все еще остаются недостаточными. Это в особенности касается нагнетателей с полукрытыми и открытыми рабочими колесами (РК), тип которых часто выбирается исходя из конструктивных соображений, реже – технологических [1–3].

Насосный агрегат должен обеспечивать заданные мощностные и напорные характеристики при максимальном значении КПД, одновременно гарантируя требуемый ресурс работы и минимальную себестоимость.

Для малорасходных высокооборотных нагнетателей с полуоткрытыми и открытыми колесами применимость полуэмпирических зависимостей, полученных для насосов с большим расходом, ограничена из-за изменения соотношения конструктивных параметров, что ведет к перераспределению потерь внутри насоса. Поэтому необходимо установить соответствующие зависимости путем обработки значительного массива данных экспериментальных исследований малорасходных нагнетателей с различными конструктивными и режимными параметрами.[4]

При выборе наилучших конструктивных решений для насоса в целом первостепенное значение имеют экспериментальные данные, позволяющие уточнить принятые основные теоретические положения и объединить в единую систему не только параметры проточной части малорасходного нагнетателя, но и его внутренних гидравлических трактов с системами уплотнений, опорами и другими элементами. Эта необходимость диктуется растущими требованиями к экономичности, ресурсу и стабильности характеристик малорасходных нагнетателей. Это, в свою очередь, обуславливает потребность в создании новых испытательных стендов и методик проведения подобных исследований. [4,5]

Для проведения численного моделирования предлагается следующая методика для колес с варьируемыми геометрическими и режимными параметрами. Данная методика предполагает получение поля скоростей основной зоны потока в межлопаточном канале центробежного колеса с цилиндрическими лопатками и включает следующие основные этапы:

1. Формирование геометрической модели колеса на основе заданных параметров ($r_1, R_2, b, \beta_1, \beta_2, z$).
2. Построение расчетной сетки в межлопаточном канале с заданным шагом интегрирования.
3. Решение системы уравнений гидродинамики (неразрывности и Навье-Стокса) для относительного движения несжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат.
4. Расчет поля скоростей в каждой точке сетки: определение относительной, переносной и абсолютной составляющих скорости.
5. Определение напора в выходном сечении на основе полученного поля скоростей с использованием теоремы Эйлера.
6. Верификация модели путём сравнения расчётных значений напора и КПД с имеющимися экспериментальными данными или полуэмпирическими зависимостями.

Геометрическая модель рабочего колеса генерировалась параметрически с использованием языка Python и библиотеки OpenCASCADE, что позволило автоматически варьировать ключевые конструктивные параметры в заданных диапазонах. Для пространственной дискретизации межлопаточных каналов применялась структурированная гексаэдральная сетка, построенная в ANSYS ICEM CFD. Минимальный размер ячейки в пристеночных областях составлял 0,01 мм, что обеспечивало значение безразмерного расстояния до стенки для корректного разрешения вязкого подслоя. Качество сетки контролировалось по критериям ортогональности и коэффициенту аспектного соотношения. Независимость решения от сетки была проверена на трёх последовательно сгущаемых сетках; изменение расчётного напора между средней и самой подробной сеткой не превышало 1,5%, что подтвердило достижение сеточной независимости.

В качестве граничных условий были заданы: на входе – массовый расход \dot{m} с равномерным профилем скорости; на выходе – среднее статическое давление; на поверхностях лопаток, ступицы и кожуха – условие прилипания. Для моделирования взаимодействия между вращающейся и неподвижной зонами использовался интерфейс «замороженный ротор» (frozen rotor).

Расчёты проводились в программном комплексе ANSYS CFX. Сходимость решения контролировалась по невязкам уравнений непрерывности и движения и стабилизации

интегральных параметров (напора, момента). Для верификации модели использовалось сравнение с аналитическим решением для ламинарного течения во вращающемся канале, а также с экспериментальными данными для центробежного нагнетателя с близкими геометрическими параметрами из источника. Расхождение по напору в рабочем диапазоне расходов не превысило 8%, что подтверждает адекватность выбранной математической модели и граничных условий.

Исходные параметры и геометрия.

Для построения математической модели в первую очередь необходимо задаться исходными данными: r_1 – радиус входа; R_2 – радиус диска; β_1 – угол входа лопатки; β_2 – угол выхода лопатки; n – количество лопаток; m – массовый расход жидкости; b – ширина канала; ω – угловая скорость вращения колеса.

Для моделирования приняты следующие исходные параметры:

Радиус входной кромки лопатки: $r_1 = 15$ мм

Радиус выходной кромки: $R_2 = 40$ мм

Ширина канала: $b = 4$ мм

Угол входа лопатки: $\beta_1 = 20-40^\circ$

Угол выхода лопатки: $\beta_3 = 60-150^\circ$

Число лопаток: $z = 4-12$

Частота вращения: $n = 5000-15000$ об/мин

Расчетная схема рабочего колеса представлена на рисунке 1. Далее выполняется расчет геометрии лопаток. [6,7]

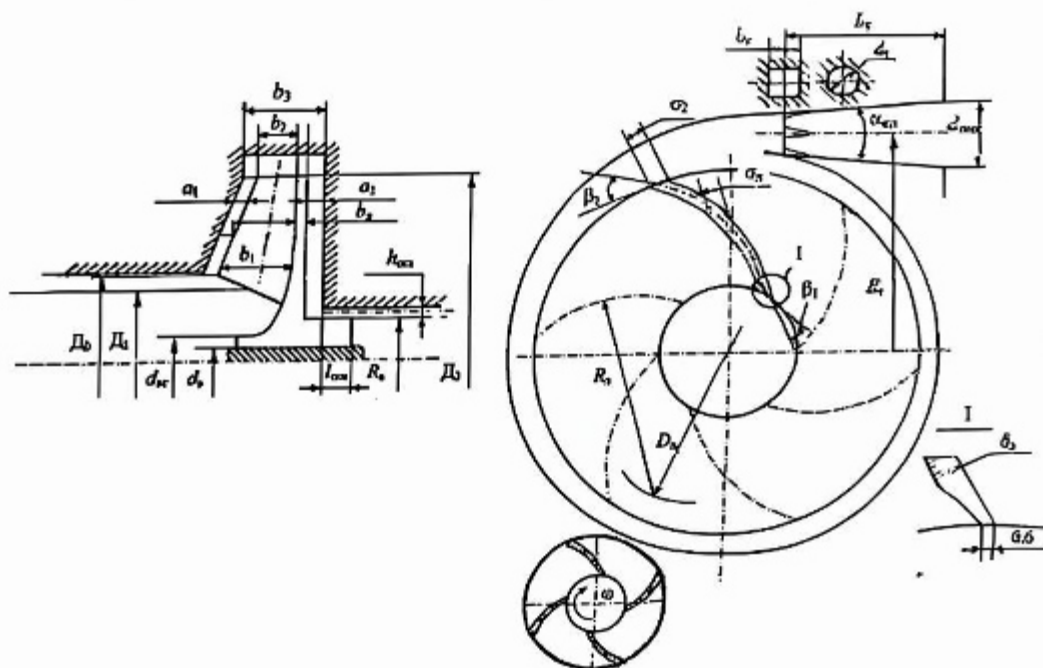


Рис. 1. Расчетная схема для колеса с цилиндрическими лопатками

После этого вычерчивается колесо и лопатки. Между двумя соседними лопатками задается сетка с необходимым шагом интегрирования. Вычисляются необходимые величины скоростей и их направления (рис. 1): относительной скорости в основной зоне потока; переносной скорости; абсолютной скорости.

Учитывая, что силовые колебания распространяются в жидкости посредством продольной упругой волны, можно заключить, что вектор скорости движения жидкости должен быть сонаправлен вектору распространения волнового движения.

Если пренебречь рассеиванием энергии и затуханием волны, можно считать величину мгновенной скорости постоянной.

Исходная (задающая) точка линии упругого силового взаимодействия находится на поверхности лопатки и определяет величину скорости вдоль этой линии, следовательно, можно задать множество характеристических линий для переносного движения, на которых значение переносной скорости является известной константой.

Для расчета расходной составляющей скорости в основной зоне потока требуется вычислить угол отклонения относительной скорости от оси абсцисс, а также радиус, на котором определяется скорость. Для этого рассчитывается переносная действительная скорость, включающая окружную и дополнительную переносную составляющую. Для определения относительной скорости в основной зоне потока суммируются ее расходная и переносная составляющие. Затем строится поле скоростей основной зоны потока межлопаточного канала. Имея поле скоростей на выходе из колеса, по теореме Эйлера рассчитывается эпюра напора по ширине канала, которая дает представление об энергетических показателях различных колес.

Для несжимаемой жидкости течение в относительном движении описывается уравнением неразрывности и уравнениями Навье-Стокса в цилиндрической системе координат. [8]

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp_e}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

где u , v_u , v – компоненты скорости вдоль осей x (вдоль обтекаемой поверхности) и y (по нормали к ней);

$p_e(x)$ – давление во внешнем потенциальном потоке, определяемое из решения для невязкого ядра течения;

ρ – плотность жидкости;

ν – кинематическая вязкость.

Теоретический напор при конечном числе лопаток рассчитывается по формуле Эйлера с учетом коэффициента влияния конечного числа лопаток. Значение напора в текущей точке определяется по формуле:

$$H = \frac{1}{g} (U_2 C_{2u} - U_1 C_{1u}) \square k_z$$

где k_z – коэффициент влияния конечного числа лопаток.

Наиболее широкое распространение в насосостроении для определения k_z получила формула К. Пфлейдерера: [9]

$$k_z = \frac{1}{1 + \frac{2\psi}{z} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}}$$

А. Стодола [10], рассматривая относительное вращение жидкости в лопаточном канале рабочего колеса как вращательное движение с линейной скоростью на периферии колеса и около стенок, определяет k_z по выражению:

$$k_z = 1 - \frac{\pi}{z} \sin \beta_2.$$

Используя данные выражения, можно получить уравнения, определяющие напор в любой точке выходного сечения рабочего колеса при произвольной геометрии его рабочих элементов – лопаток. Комбинируя формулу Эйлера для теоретического напора с поправочным коэффициентом на конечное число лопаток, а также учитывая распределение

скорости, полученное из численного решения, давление в точке с координатами (r, φ) на выходе может быть описано обобщённым соотношением.

Данный подход позволяет перейти от осреднённой оценки напора к анализу его распределения по выходному сечению, что является ключевым для оптимизации гидравлических потерь и формы лопаточного канала.

В качестве первого этапа анализа влияния конструктивных параметров на энергоэффективность было исследовано количество лопаток z рабочего колеса. Численные расчёты проводились для диапазона $z = 4-12$ при фиксированных значениях угла выхода лопаток $\beta_2 = 90^\circ$ и частоты вращения $n = 10000$ об/мин. Полученные значения коэффициента влияния конечного числа лопаток k_z , теоретического напора H и относительного КПД η представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Зависимость коэффициента влияния и теоретического напора от числа лопаток ($\beta_2 = 90^\circ, n = 10000$ об/мин)

Число лопаток, z	Коэффициент k_z	Теоретический напор H , м	Относительный КПД, η
4	0,85	152	0,68
5	0,88	157	0,72
6	0,91	162	0,76
7	0,92	164	0,78
8	0,93	166	0,79
9	0,94	167	0,77
10	0,95	168	0,75
12	0,96	169	0,72

Анализ результатов показывает, что оптимальное число лопаток для малорасходного насоса составляет 6-8. При меньшем числе лопаток ($z < 6$) наблюдается значительное снижение напора из-за увеличения относительного шага и роста вторичных течений. При большем числе лопаток ($z > 8$) увеличиваются потери на трение и ухудшаются условия входа потока.

На рисунке 2 представлены зависимости теоретического напора от числа лопаток z . Теоретический напор определяется как осреднённые значения по выходному сечению колеса.

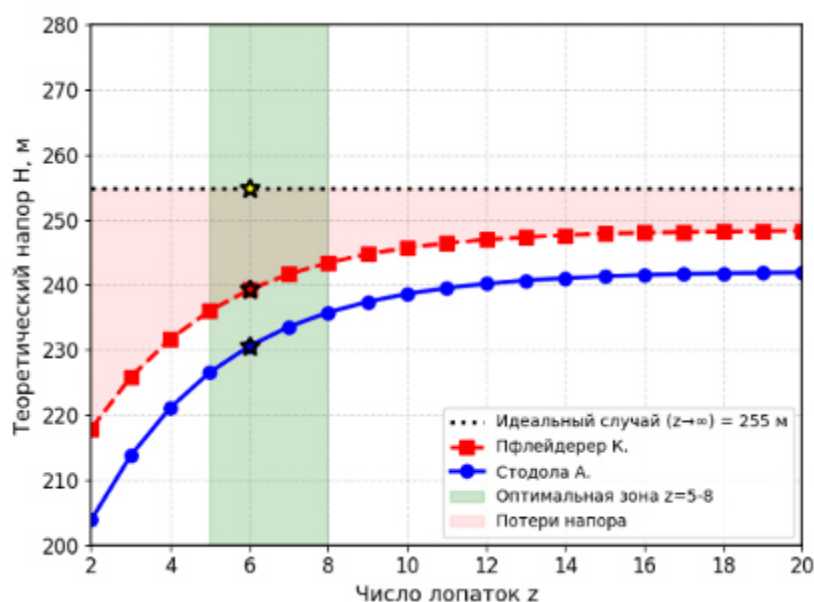


Рисунок 2 Зависимость теоретического напора от числа лопаток z

Для оценки влияния геометрии лопаток на энергоэффективность были проанализированы характеристики рабочего колеса при различных углах выхода лопаток β_2 . Результаты расчётов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Характеристики рабочего колеса в зависимости от угла β_2 ($z = 6, n = 10000$ об/мин)

Угол $\beta_2, ^\circ$	Теоретический напор Н, м	Гидравлический КПД, η_g	Кавитационный запас, Δh , м
60	145	0,72	4,2
90	164	0,78	3,5
120	178	0,82	2,8
150	185	0,79	2,1

Установлено, что максимальное значение КПД достигается при $\beta_2 = 120-130^\circ$. Увеличение угла β_2 свыше 130° приводит к росту теоретического напора, но одновременно увеличивает риск кавитации и снижает стабильность характеристики.

Вторым ключевым конструктивным параметром, определяющим энергоэффективность рабочего колеса, является количество лопаток. Для количественной оценки влияния конечного числа лопаток на энергетические показатели был проанализирован коэффициент k_z . Графическая зависимость коэффициента влияния k_z , определенного по формулам Пфлейдерера и Стодола, от числа лопаток z представлена на рисунке 3.

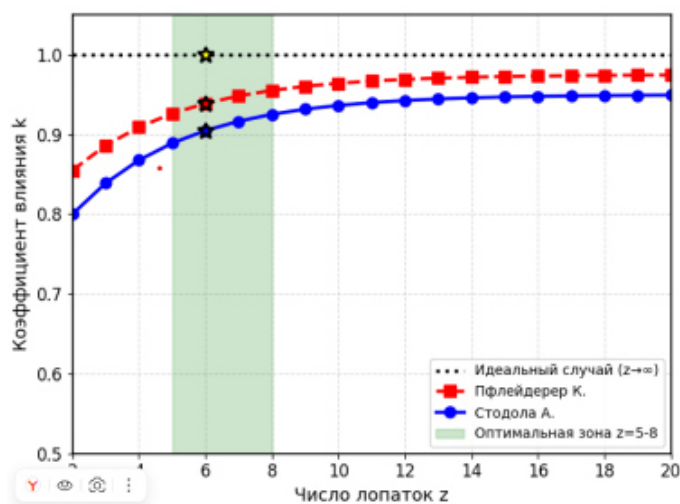


Рис. 3. Зависимость коэффициента k_z от числа лопаток по Пфлейдереру и Стодоле

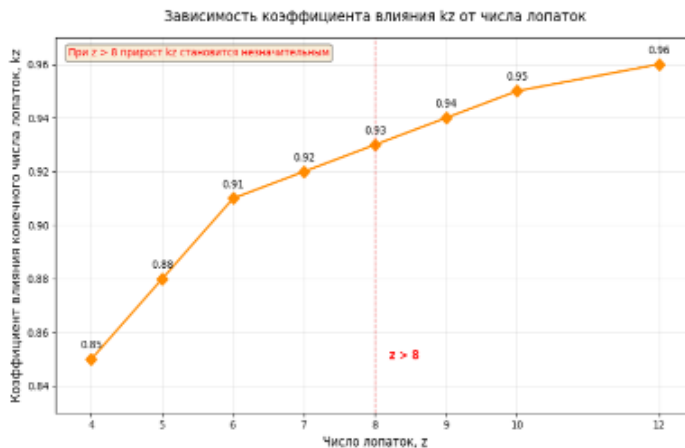


Рисунок 4. Расчетная зависимость коэффициента k_z от числа лопаток

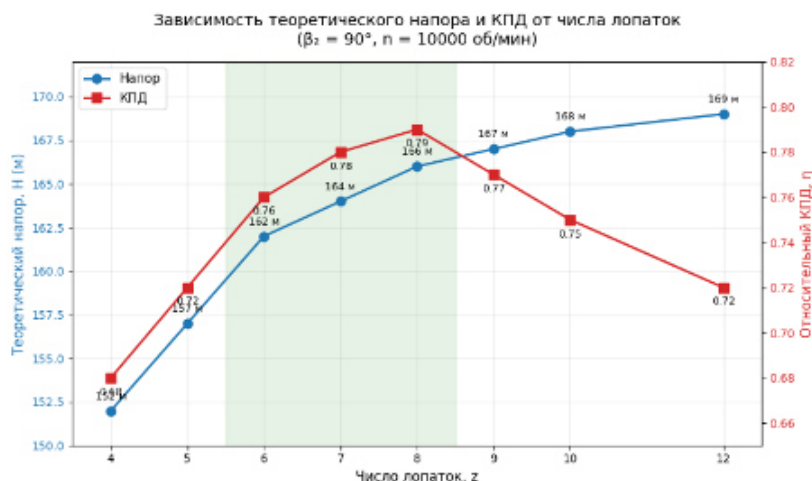


Рисунок 5. Зависимость теоретического напора и КПД от числа лопаток

Для анализа влияния конечного числа лопаток на энергетические показатели рабочего колеса, помимо теоретических зависимостей Пфлейдерера и Стодолы, было выполнено численное моделирование, учитывающее специфику течения в межлопаточных каналах малорасходных нагнетателей. Это позволило получить уточнённые значения коэффициента влияния k_z , более соответствующие реальным условиям работы насосов с полуоткрытыми и открытыми колёсами. На рисунке 4 представлена расчетная зависимость коэффициента k_z от числа лопаток, полученная в результате моделирования.

Установлено, что коэффициент влияния конечного числа лопаток k_z монотонно возрастает с увеличением числа лопаток z , однако при $z > 8$ его прирост становится незначительным, что соответствует снижению относительного КПД из-за роста гидравлических потерь (рисунки 4 и 5).

При чрезмерном увеличении числа лопаток ($z > 8$) рост гидравлических потерь на трение и ухудшение условий входа потока перевешивают выигрыш в напоре, что приводит к снижению общего КПД. Таким образом, рисунок 5 наглядно подтверждает оптимальность выбора количества лопаток в диапазоне 6–8 для обеспечения высокой энергоэффективности малорасходного центробежного нагнетателя.

Разработанные математическая модель и алгоритм расчета позволяют определять скорости в основной зоне потока межлопаточного канала центробежного нагнетателя, что дает возможность по заранее заданной геометрии рабочего колеса моделировать его энергетические показатели и составляющие энергетического баланса мощности в рассматриваемом диапазоне режимов работы насоса.

Результаты испытаний малорасходных нагнетателей подтверждают обоснованность научно-исследовательских разработок, проводимых для достижения оптимальных конструкторских и энергетических параметров, что в перспективе позволит использовать полученные результаты для создания более эффективных и экономичных малорасходных нагнетателей. На основе полученных результатов создана 3D-модель, позволяющая проводить численные эксперименты и сравнительный анализ их результатов. Полученные в ходе расчёта результаты, позволяют использовать их для оптимизации количества лопастей в рабочем колесе насоса.

Библиографические ссылки

1. Краев М.В. Гидродинамика проточной части малорасходных центробежных насосов с визуализацией и трансформацией потока: Отчет о НИР (№75, этап I) /Завод-втуз

Краснояр. Политехн. Ин-та.: М.В. Краев, В.П. Карасев, А.А. Кишкин, Д.Н. Сизых, № Г.р. Х-62925 Красноярск, 1989. 59 с.

2. Двирный В.В. Малорасходные автономные нагреватели. / В.В.Двирный, М.В.Краев, 1985, 129с.

3. Краев, М. В. Малорасходные насосы авиационных и космических систем / М. В. Краев, В. А. Лукин, Б. В. Овсянников. – Москва : Машиностроение, 1985. – 128 с

4. Исследование течения вязкой несжимаемой жидкости в боковой полости вращения центробежных насосов и газовых турбин жидкостных ракетных двигателей на основе теории пространственного пограничного слоя / Д. А. Жуйков, Ю. Н. Шевченко, А. А. Кишкин [и др.] // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2025. – Т. 9, № 1. – С. 92-100. – DOI 10.25206/2588-0373-2025-9-1-92-100. – EDN XZQZJG.

5. Динамические параметры потока в естественных криволинейных координатах для линии тока во вращающемся канале / В. В. Черненко, Д. В. Черненко, М. И. Толстопятов [и др.] // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2024. – Т. 25, № 4. – С. 493-506. – DOI 10.31772/2712-8970-2024-25-4-493-506. – EDN BGNBEC.

6. Краева, Е. М. К расчету эксплуатационных параметров центробежных насосов малой быстроходности / Е. М. Краева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 2(23). – С. 168-170. – EDN KUHJPN.

7. Назаров, В. П. Модель течения в рабочем колесе центробежного насоса / В. П. Назаров, В. В. Черненко, Д. В. Черненко // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2021. – Т. 22, № 3. – С. 494-503. – DOI 10.31772/2712-8970-2021-22-3-494-503. – EDN AETXSM.

8. Степанов, Г. Ю. Гидродинамика решёток турбомашин / Г. Ю. Степанов. – Москва: Физматгиз, 1962. – 512 с.

9. Пфлейдерер К.Л. Лопаточные машины для жидкостей и газов. М.: Гостехиздат, 1960. 684 с.

10. Stodola A. Steam and gas turbines, 1927.

© Черненко В. В., Черненко Д. В., 2026

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Н. В. Бекшаев

Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nekich02@mail.ru

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа основных методов вибрационных испытаний для контроля качества элементов жидкостных ракетных двигателей.

Ключевые слова: вибрационные испытания, жидкостный ракетный двигатель.

Вибрационное испытание представляет собой неразрушающий метод оценки целостности и рабочих характеристик компонентов ЖРД, в частности лопаток турбин. Метод основан на возбуждении испытуемого объекта на собственных резонансных частотах и измерении отклика на эти возбуждения.

Принцип вибрационного метода заключается в анализе реакции объекта на внешние механические колебания контролируемой частоты и амплитуды. Измеряемые динамические характеристики включают частоты собственных колебаний, коэффициенты затухания и формы колебаний.

Классификация методов вибрационных испытаний:

1. Синусоидальные вибрационные испытания

Принцип: Воздействие на образец синусоидальными колебаниями с заданной частотой и амплитудой для имитации эксплуатационных условий.

Основные параметры:

- Частотный диапазон: от нескольких герц до нескольких килогерц
- Амплитуда: определяется требованиями испытаний и характеристиками изделия
- Продолжительность воздействия

Оборудование: Вибростенды с прецизионным управлением параметрами, акселерометры, лазерные виброметры.

Результаты: Регистрируемые данные формируют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) или частотную передаточную функцию. Пики на графиках указывают на резонансные частоты конструкции.

Применение: Идентификация собственных частот, ранние стадии разработки, испытания компонентов с известными рабочими частотами.

2. Случайные вибрационные испытания

Принцип: Применение случайных сигналов для моделирования непредсказуемых эксплуатационных условий с изменяющейся частотой и амплитудой.

Характеристики: Вибрации описываются спектром мощности, определяющим распределение энергии по частотам.

Параметры:

- Уровень спектральной плотности мощности
- Частотный диапазон
- Длительность испытаний

Цели: Оценка прочности при случайных нагрузках, выявление конструктивных недостатков, оценка долговечности в реальных условиях.

Применение: Квалификационные испытания авиакосмической техники, где преобладают случайные вибрации.

3. Модальные испытания

Принцип: Определение динамических характеристик структур через возбуждение внешними силами (ударом или вибрацией) и измерение ответной реакции.

Модальные параметры:

- Частоты собственных колебаний
- Формы колебаний (геометрическое распределение деформаций)
- Коэффициенты затухания

Методы возбуждения:

- Ударный метод
- Вибрационный метод
- Лазерная интерферометрия

Оборудование: Акселерометры, микрофоны, высокоскоростные камеры, лазерные системы.

Применение: Анализ сложных конструкций, валидация проектных решений, улучшение демпфирующих свойств.

4. Вибрационные испытания на усталость

Принцип: Оценка прочности и долговечности под воздействием циклических вибрационных нагрузок.

Типы нагружения:

- Синусоидальные испытания с постоянной частотой и амплитудой
- Случайные вибрации для моделирования реальных условий
- Ударные испытания для проверки устойчивости к импульсным воздействиям

Цели:

- Определение предела усталости материала
- Оценка времени до разрушения
- Выявление слабых мест конструкции

Применение: Определение срока службы изделий, подвергающихся постоянной вибрации.

5. Акустические вибрационные испытания

Принцип: Возбуждение объекта звуковыми волнами высокой интенсивности и анализ реакции через микрофоны, акселерометры и датчики.

Методы:

- Акустическая эмиссия: регистрация звуковых волн при механических деформациях
- Лазерная акустика: высокоточное возбуждение и измерение
- Импульсный метод: анализ отклика на короткий звуковой импульс

Цели:

- Определение модальных параметров
- Выявление резонансных частот
- Оценка акустических свойств (звукопоглощение, звукоизоляция)

Применение: Компоненты ракетно-космической техники, подвергающиеся воздействию интенсивного шума при запуске и работе двигателей.

Преимущества вибрационного метода:

- Неразрушающий характер испытаний
- Выявление скрытых повреждений, невидимых при визуальном осмотре
- Быстрота и эффективность для массового тестирования
- Возможность автоматизации процесса
- Прогнозирование поведения в реальных условиях эксплуатации
- Применимость к различным материалам (металлы, композиты)

Ограничения:

- Необходимость специализированного оборудования и квалифицированного персонала
- Сложность интерпретации результатов в некоторых случаях
- Возможность пропуска отдельных типов повреждений (поверхностные трещины)

Таблица 1.

Сравнительные характеристики типов вибрационных испытаний

Тип	Характер воздействия	Основное назначение	Применение
Синусоидальные	Предсказуемая линейная вибрация с фиксированной частотой	Идентификация резонансных частот	Ранние этапы разработки
Случайные	Нерегулярный сигнал всех частот диапазона	Моделирование реальных условий	Квалификационные испытания
Модальные	Возбуждение для анализа динамики	Детальный анализ форм колебаний	Сложные конструкции
На усталость	Длительная циклическая нагрузка	Определение срока службы	Продукция с постоянной вибрацией
Акустические	Высокоинтенсивное акустическое поле	Оценка стойкости к шуму	Ракетно-космическая техника

Методика проведения испытаний:

Процедура:

1. Подготовка: закрепление объекта в приспособлении, обеспечивающем требуемые граничные условия
2. Возбуждение: приложение переменной силы через электродинамический вибратор или электромагнит (рис. 1)
3. Измерение отклика: регистрация вибрации датчиками на поверхности или вблизи объекта
4. Анализ данных: определение резонансных частот, форм колебаний и коэффициентов затухания

Интерпретация результатов:

- Резонансные частоты характеризуют жесткость и массу; их снижение указывает на потерю жесткости (трещины)
- Формы колебаний выявляют повреждения или ослабленные участки
- Коэффициенты затухания отражают рассеяние энергии; увеличение указывает на наличие трения или демпфирования

В состав виброустановки входят: вибростенд (вибровозбудитель) 4, преобразующий энергию любого вида в энергию механических колебаний (в вибрацию); генератор 2 воздействующих сигналов, создающий управляющее воздействие на вибростенд, соответствующее данному характеру вибрации и режиму испытаний; усилитель мощности 3, предназначенный для получения требуемого значения вынуждающей силы.

В конструкцию вибростенда входит как неподвижная часть, и подвижная система, совершающая вибрационное движение. Устойчивое равновесие и ориентацию подвижной системы относительно неподвижной части обеспечивает система подвески. Испытуемое

изделие устанавливается и закрепляется для передачи ему вибрации на конструктивной части подвижной системы, называемой вибростолом 5.

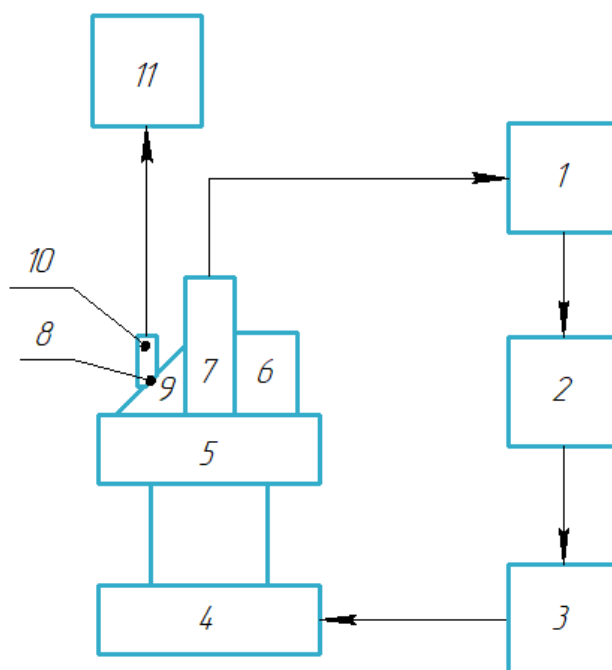


Рис. 1. Схема установки для вибрационных испытаний

1 – система управления; 2 – генератор воздействующих усилий; 3 – усилитель мощности; 4 – вибровозбудитель; 5 – вибростол; 6 – контрольный датчик; 7 – контрольная точка; 8 – точка крепления регистрирующего датчика; 9 – испытываемое изделие; 10 – датчи, закрепляемый на изделии; 11 – средство регистрации параметров вибрации

Различают две основные точки: контрольную и измерительную. Контрольная точка 6 располагается в том месте, относительно которого должно проводиться измерение значений параметров вибрации испытываемого изделия (на столе вибростенда, на приспособлении, на самом изделии), причем она должна находиться как можно ближе к одной из точек крепления и быть с ней жестко связанной. Сигнал с ВИП (виброизмерительный преобразователь) 7, расположенного в контрольной точке, используется в системе управления 1, обеспечивающей поддержание значений параметров вибрации на определенном уровне.

Измерительная точка 8 располагается в том месте испытываемого изделия 9, где значения параметров вибрации определяют исход испытаний. В точку 8 помещают ВИП 10, сигнал с которого подводится к средствам измерения, анализа и обработки полученных данных 11. Таким образом, результаты испытаний оцениваются значениями параметров вибрации, полученными в измерительной точке при условии обеспечения заданных значений в контрольной точке.

Вибрационные методы испытаний являются неотъемлемым элементом обеспечения качества и надёжности компонентов ЖРД. Комплексное применение различных методов позволяет:

- Точно определить собственные частоты колебаний, формы мод и демпфирующие свойства
- Выявить потенциально опасные резонансные режимы работы
- Оценить усталостную прочность и допустимые нагрузки
- Валидировать теоретические модели и расчеты
- Улучшить конструкцию на основе экспериментальных данных

- Обеспечить безопасность и надежность на протяжении срока службы

Вибрационные методы минимизируют риск аварий и дорогостоящих ремонтов, гарантируя бесперебойную работу сложных и ответственных систем ракетно-космической техники.

Библиографические ссылки

1. Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н., Стадников А.Н. и др. Экспериментально-расчетные исследования эффективности различных способов демпфирования колебаний деталей газотурбинных двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2015. Т. 14. № 3-1. С. 171-182.

2. Ножницкий Ю.А., Балуев Б.А., Федина Ю.А. Экспериментальные исследования прочностной надежности перспективных газотурбинных двигателей // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19. № 3(69). С. 3-14.

3. Данилкин С.Ю., Шкуров В.В., Мазикина Т.И. и др. Развитие методов исследования колебаний лопаток рабочих колес турбомашин при стендовых испытаниях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23. № 2(84). С. 17-25.

4. Патент РФ № 2673950 С1. Способ определения форм колебаний вращающихся колес турбомашин / Селезнев В.Г., Головченко И.Ю.; заявл. 19.01.2018; опубл. 03.12.2018.

5. Боришанский К.Н., Григорьев Б.Е., Григорьев С.Ю. и др. Методика непрерывного контроля вибрационного состояния рабочих лопаток турбомашин // Теплоэнергетика. 2000. № 5. С. 46-51.

6. ГОСТ 30630.1.2-99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 26 с.

© Бекшаев Н. В., 2026

РАДИОВОЛНОВОЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ: ПРИНЦИПЫ, МЕТОДИКИ, ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

М. И. Лира, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: maksim.lira4@mail.ru

В статье рассматривается радиоволновой метод неразрушающего контроля (РВНК) как перспективное направление в области диагностики материалов и изделий. Проанализированы физические основы метода, основанные на взаимодействии электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона с контролируемым объектом. Приведена классификация основных типов радиоволнового контроля: амплитудный, геометрический, поляризационный, радиоскопический, а также методы с использованием термобумаг и термолюминофоров. Подробно описаны принципы работы, применяемое оборудование и ключевые информативные параметры для каждого метода. Особое внимание уделено преимуществам РВНК: неразрушающий характер, высокая чувствительность к мелким дефектам, возможность контроля глубоких слоёв и бесконтактных измерений. Определена сфера применения метода, охватывающая контроль диэлектриков, композитов, тонкостенных металлических конструкций в таких отраслях, как авиационно-космическая промышленность, машиностроение, энергетика и транспорт. Отмечены существующие ограничения метода, связанные с высокой стоимостью оборудования, требованием к квалификации операторов и ограниченной применимостью для материалов с высокой электропроводностью. Сделан вывод о том, что РВНК является эффективным инструментом для повышения качества, надёжности и безопасности промышленной продукции при условии корректного выбора методики и аппаратуры.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, радиоволновой метод, СВЧ-диагностика, дефектоскопия, контроль материалов, бесконтактный контроль.

Современные требования к качеству и надёжности промышленной продукции, особенно в высокотехнологичных отраслях, таких как авиакосмическая инженерия, энергетика и транспорт, делают неразрушающий контроль (НК) критически важным этапом жизненного цикла изделий [1]. Среди многообразия методов НК радиоволновой метод выделяется возможностью бесконтактного и высокочувствительного контроля внутренней структуры и свойств материалов без их повреждения [2]. Метод основан на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиодиапазона, преимущественно сверхвысоких частот (СВЧ), с объектом контроля.

Целью данной работы является систематический анализ радиоволнового метода неразрушающего контроля: рассмотрение его физических основ, классификация основных методик, оценка преимуществ и ограничений, а также определение актуальных областей практического применения.

Физические основы радиоволновых методов НК.

Радиоволновой контроль базируется на регистрации изменений параметров электромагнитной волны (амплитуды, фазы, поляризации, времени прохождения) после её взаимодействия с объектом. Эти изменения обусловлены процессами отражения, прохождения, поглощения и рассеяния волны на неоднородностях материала (дефектах, границах раздела, изменениях толщины или состава).

В радиоволновом контроле при анализе физических принципов, элементной базы и построении приборов контроля используются как классические, так и квантовые представления о природе электромагнитного поля. Все виды взаимодействия электромагнитного поля с различными материалами описываются системой уравнений Максвелла. Векторы напряженности и индукции магнитного и электрического полей, входящие в эту систему, связаны между собой через материальные параметры среды: абсолютную диэлектрическую проницаемость, абсолютную магнитную проницаемость и проводимость. Из уравнений Максвелла следует, что взаимодействие между электрической и магнитной составляющей поля возрастает с увеличением частоты. Отсюда следует вывод, что с увеличением частоты радиоволновой контроль становится более эффективным. Поэтому в практике радиоволновых методов применяют волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона: длиной $\lambda = 10^{-1} - 10^{-3}$ мм; частотой $f = 3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^{12}$ Гц; энергией кванта $E = 10^{-5} - 10^{-3}$ эВ.

Электронные генераторы СВЧ-колебаний строят на базе различных электровакуумных приборов. Наибольшее применение находят клистроны, затем магнетроны, лампы обратной волны. Современный парк радиоволновой аппаратуры построен на применении в основном клистронных генераторов мощностью 5100 мВт, перекрывающий практически весь диапазон СВЧ. Функциональная схема генератора на отражательном клистроне приведена на рис 1 [6].

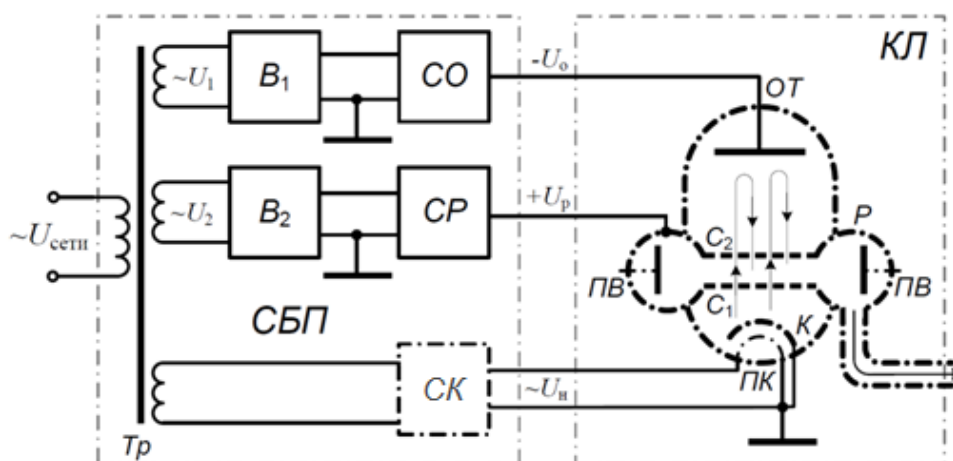


Рис. 1. Функциональная схема генератора на отражательном клистроне:
 КЛ – отражательный клистон; К – катод; ПК – подогреватель катода;
 С1 и С2 – нижняя и верхняя сетки, соединяемые с объемным резонатором;
 Р – резонатор; ОТ – отражатель; ПВ – подстроечные винты; СБП – блок питания;
 Tr – трансформатор; В1 и В2 – выпрямители; СО – стабилизатор отражателя;
 СР – стабилизатор резонатора; СК – стабилизатор подогревателя катода

Методы РВНК можно классифицировать по различным признакам: по характеру взаимодействия (проходящее/отражённое излучение), по регистрируемому параметру (амплитудный, фазовый, поляризационный) или по решаемой задаче (дефектоскопия, толщинометрия, структуроскопия) [3].

Основные методы радиоволнового контроля и их характеристики:

1. Амплитудный (спектрометрический) метод.

Принцип: Регистрация и анализ энергетического спектра прошедшего или отражённого излучения. Наличие дефектов или изменение состава материала влияет на спектральное распределение (рис. 1).

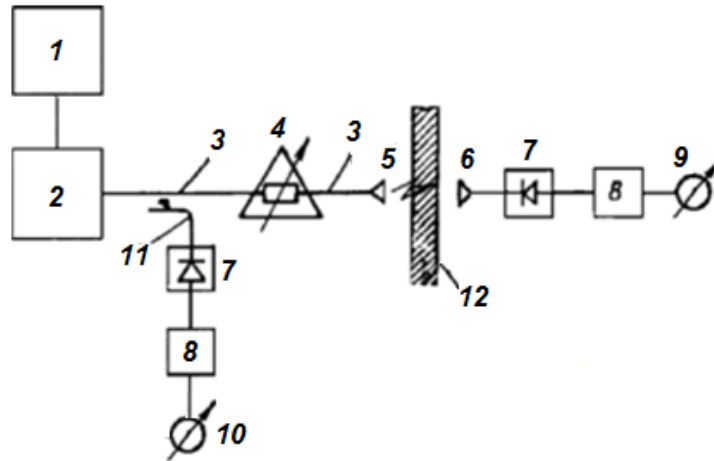


Рис. 1. Функциональная схема установки, работающей по амплитудному методу:
 1 – источник питания; 2 – генератор радиоволн; 3 – волновой тракт; 4 – аттенюатор;
 5 – антенна; 6 – приемная антенна; 7 – детекторная секция; 8 – усилитель;
 9 – индикатор; 10 – индикатор; 11 – направленный ответвитель; 12 – изделие

Оборудование: Спектрометры с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), радиометры-спектрометры.

Применение: Определение радионуклидного состава, контроль однородности материалов.

2. Геометрический метод (контроль с учётом геометрической нерезкости).

Принцип: Учёт влияния размеров фокусного пятна источника излучения и геометрии расположения источника, объекта и детектора на чёткость получаемого радиационного изображения (рис. 2).

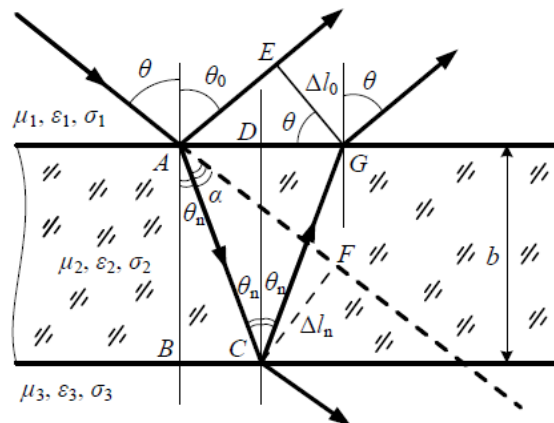


Рис. 2. Принцип геометрического метода на основе фиксации отраженных волн от границ различных сред

Оборудование: Источники излучения с формированием пучка заданной геометрии (пирамида, конус), детекторы (рентгеновская плёнка, плоскопанельные детекторы).

Применение: Обнаружение макродефектов (пор, раковин, трещин) и контроль внутренней геометрии деталей.

3. Поляризационный метод.

Принцип: Измерение изменения состояния поляризации излучения после прохождения через объект. Степень поляризации связана с толщиной, структурой или наличием слоистых дефектов.

Оборудование: Поляризационные радиометры, двухчастотные приёмные устройства с ортогонально расположенными датчиками.

Применение: Контроль толщины плёнок (например, разливов нефти), диагностика композитных материалов.

4. Радиоскопический (фотоуправляемый) метод.

Принцип: Преобразование радиационного изображения объекта в реальном времени в световое (оптическое) изображение на экране.

Оборудование: Радиационно-оптические преобразователи, радиационно-телевизионные установки.

Применение: Оперативный контроль сварных швов, сборки узлов, печатных плат. Преимущество: экспрессность и возможность стереоскопического анализа.

5. Методы с использованием термоиндикаторов.

Метод термобумаг: Визуализация температурных полей на поверхности объекта с помощью бумаги с термочувствительным слоем. Позволяет косвенно судить о внутренних неоднородностях по характеру нагрева.

Термолюминесцентная дозиметрия (ТЛД): Использование термолюминофоров, накапливающих энергию ионизирующего излучения. При последующем нагреве испускается свет, интенсивность которого пропорциональна поглощённой дозе.

Применение: Контроль температурных режимов, индивидуальный дозиметрический контроль, мониторинг радиационной обстановки.

Преимущества, недостатки и сфера применения РВНК:

1. Неразрушающий и бесконтактный характер. Позволяет проверять изделия без повреждений и без прямого контакта датчика с объектом.

2. Высокая чувствительность. Способность обнаруживать малые дефекты (микротрещины, поры) как на поверхности, так и в объёме материала.

3. Глубина контроля. Возможность диагностики внутренних слоёв и дефектов, расположенных на значительной глубине.

4. Локальность и помехоустойчивость. Возможность фокусировки излучения для контроля конкретной зоны с минимальным влиянием краевых эффектов.

5. Оперативность. Ряд методов (например, радиоскопия) обеспечивает контроль в реальном времени.

6. Возможность контроля динамических процессов. Малая инерционность системы считывания, возможность проведения непрерывных измерений, сигналы на выходе системы не требуют дополнительных преобразований.

Основные ограничения:

1. Ограниченная применимость к материалам. Метод наиболее эффективен для диэлектриков (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнетодиэлектриков и полупроводников. Для электропроводящих материалов (толстостенные металлы) применим только для контроля геометрии и поверхностных дефектов из-за полного отражения волн.

2. Высокая стоимость. Аппаратура СВЧ-диапазона и специализированные системы обработки данных требуют значительных инвестиций.

3. Требования к квалификации. Корректная интерпретация результатов требует от специалиста глубоких знаний в области радиофизики и диагностики.

4. Влияние внешних факторов. Результаты могут искажаться из-за неровностей поверхности, влажности материала, сторонних электромагнитных помех.

РВНК находит применение в широком спектре отраслей для решения задач:

- Дефектоскопии обнаружение трещин, расслоений, пор, инородных включений.
- Толщинометрии измерение толщины стенок, покрытий, плёнок.
- Структуроскопии контроль однородности состава, степени отверждения полимеров, влагосодержания.

Контроля геометрических параметров проверка размеров, формы внутренних полостей.

Отрасли промышленности: авиационно-космическая (контроль композитных конструкций, теплозащитных покрытий); машиностроение (диагностика сварных швов, деталей двигателей); энергетика (мониторинг состояния лопаток турбин, трубопроводов); железнодорожный транспорт (контроль колёсных пар, рельсов); нефтегазовый комплекс (оценка коррозии труб, сварных соединений) [4, 5].

Радиоволновой метод неразрушающего контроля представляет собой мощный и многогранный инструмент для обеспечения качества и безопасности в современной промышленности. Его универсальность, обусловленная разнообразием методик (амплитудной, поляризационной, радиоскопической и др.), позволяет решать комплексные задачи по оценке целостности, геометрии и структурных свойств широкого класса материалов, прежде всего диэлектрических и композитных.

Ключевыми факторами успешного внедрения РВНК являются:

1. обоснованный выбор методики, строго соответствующий свойствам контролируемого материала и типу выявляемых дефектов;

2. использование современной аппаратной базы, обеспечивающей необходимые точность, чувствительность и быстродействие;

3. высокий уровень подготовки специалистов, способных не только проводить измерения, но и грамотно интерпретировать полученные данные.

Несмотря на существующие ограничения (стоимость, требования к материалам), потенциал радиоволнового метода продолжает расти благодаря развитию элементной базы СВЧ-техники, микропроцессоров и систем обработки сигналов. Дальнейшая интеграция РВНК в автоматизированные технологические линии и системы прогнозной аналитики будет способствовать созданию более надёжных, экономичных и безопасных промышленных изделий и конструкций.

Библиографические ссылки

1. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль. – М.: Высшая школа, 2004.
2. Матвеев В. И. Радиоволновой контроль / под ред. Ключева В. В. – М.: Спектр, 2011. – 184 с.
3. Федосов А. В., Гайнуллина Л. А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – Т. 11. – № 2. – С. 73-78.
4. Азаренко Е. В., Гончаренко Ю. Ю., Гончаренко Д. Г. Методы неразрушающего контроля состояния опасных объектов и механизмов // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2013. – № 3. – С. 69-73.
5. Соснин Ф. Р. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 5. Радиоволновой, тепловой и оптический контроль. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
6. Вечеркин М.В. Физические основы и методы радиоволнового контроля: учебное пособие Магнитогорск: ФГБОУ ВПО "МГТУ", 2015, 68 С.

© Лира М. И., Журавлев В. Ю., 2026

**«КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

УДК 625.143.4:531.781.2

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ СРЕДСТВАМИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

И. В. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nazarov_iv@sibsau.ru

В статье рассматривается проблема контроля технического состояния рельсовой инфраструктуры с использованием тензометрических комплексов. Предложена концепция автоматизированной системы мониторинга на основе тензочувствительных элементов из наномодифицированного материала с углеродными нанотрубками. Приведены результаты лабораторных и полевых испытаний, подтверждающие эффективность разработанного подхода.

Ключевые слова: тензометрия, рельсовый путь, диагностика, наномодифицированные материалы, углеродные нанотрубки, автоматизированный контроль, напряжённо-деформированное состояние, безопасность движения, мониторинг инфраструктуры.

Железнодорожный транспорт является одной из ключевых составляющих транспортной инфраструктуры Российской Федерации, обеспечивающей перевозку значительной доли грузов и пассажиров. Протяжённость железнодорожных путей общего пользования в России составляет более 86 тысяч километров, что определяет масштаб задач по обеспечению их безопасной эксплуатации. Безопасность движения поездов напрямую зависит от технического состояния рельсового пути, который подвергается значительным статическим и динамическим нагрузкам в процессе эксплуатации [1].

По данным ОАО «РЖД», около 60% отказов технических средств связаны с дефектами рельсов и элементов верхнего строения пути. Ежегодно на сети железных дорог выявляется более 30 тысяч острodefектных рельсов, требующих немедленной замены. При этом значительная часть дефектов обнаруживается на поздних стадиях развития, когда риск возникновения аварийной ситуации существенно возрастает. Экономический ущерб от аварий, связанных с дефектами рельсового пути, исчисляется миллиардами рублей ежегодно [2].

Традиционные методы контроля состояния рельсовых путей, основанные на периодических обследованиях дефектоскопными вагонами и путеизмерительными комплексами, не всегда обеспечивают своевременное обнаружение развивающихся дефектов. Периодичность таких обследований составляет от нескольких дней до нескольких недель, что создаёт временные окна, в течение которых дефект может достичь критического размера. Мировой опыт показывает, что переход к системам непрерывного мониторинга позволяет сократить количество аварийных ситуаций на 30-40% и оптимизировать затраты на техническое обслуживание пути. Это обуславливает актуальность разработки

систем непрерывного мониторинга, способных в режиме реального времени отслеживать изменения напряжённо-деформированного состояния (НДС) рельсов и своевременно сигнализировать о возникновении потенциально опасных ситуаций.

Целью данной работы является разработка концепции автоматизированной системы контроля состояния рельсовых путей на основе тензочувствительных элементов из наномодифицированного материала и проведение комплекса экспериментальных исследований для подтверждения эффективности предложенного подхода.

1. Анализ существующих методов контроля рельсовых путей

В настоящее время для контроля технического состояния рельсового пути применяются следующие основные методы: ультразвуковая дефектоскопия, магнитная дефектоскопия, вихретоковый контроль, визуально-измерительный контроль, а также методы на основе анализа вибрационных характеристик подвижного состава. Каждый из указанных методов имеет свою область применения, преимущества и ограничения [3].

Ультразвуковая дефектоскопия является наиболее распространённым методом выявления внутренних дефектов рельсов. Метод основан на регистрации отражённых ультразвуковых сигналов от несплошностей металла. Основными преимуществами метода являются высокая чувствительность к внутренним дефектам и возможность определения их размеров и координат. Однако метод имеет существенные ограничения: низкую производительность при ручном контроле, зависимость результатов от квалификации оператора, невозможность обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов малого размера на начальной стадии развития.

Магнитная дефектоскопия позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты рельсов. Принцип метода основан на регистрации искажений магнитного поля в зонах дефектов. Метод эффективен для обнаружения поперечных трещин, однако имеет ограниченную чувствительность к продольным дефектам и дефектам, ориентированным параллельно направлению намагничивания.

Общим недостатком перечисленных методов является их дискретный характер – контроль выполняется периодически при проходе дефектоскопного оборудования. Между проверками дефект может развиваться до критического размера. Кроме того, данные методы фиксируют уже сформировавшиеся дефекты и не позволяют оценивать текущее НДС рельсов и прогнозировать возникновение дефектов [4].

Перспективным направлением является применение тензометрических методов контроля, позволяющих оценивать НДС конструкций непосредственно в процессе эксплуатации. Традиционные тензорезисторы на основе металлической фольги имеют ряд ограничений: относительно невысокую чувствительность (коэффициент тензочувствительности $k = 2-2,5$), существенную зависимость показаний от температуры, ограниченный ресурс при циклических нагрузках (порядка 10^6 циклов), а также необходимость обеспечения надёжной защиты от воздействия влаги и агрессивных сред.

2. Тензочувствительные элементы из наномодифицированного материала

Для решения указанных проблем предлагается использование тензочувствительных элементов на основе наномодифицированного композиционного материала. В качестве основы применяется полимерная матрица на основе эпоксидной смолы с введёнными многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ). Выбор данного типа наполнителя обусловлен уникальным сочетанием механических и электрофизических свойств углеродных нанотрубок: высоким модулем упругости (до 1 ТПа), значительной удельной поверхностью и способностью образовывать проводящую сеть при малых концентрациях [5].

Механизм тензочувствительности наномодифицированного композита основан на изменении контактного сопротивления между нанотрубками при деформации материала. При растяжении образца расстояние между нанотрубками увеличивается, что приво-

дит к разрыву части проводящих контактов и возрастанию электрического сопротивления. При сжатии происходит обратный процесс – сопротивление уменьшается. Данный механизм обеспечивает существенно более высокую чувствительность по сравнению с традиционными металлическими тензорезисторами, работающими на принципе изменения геометрических размеров проводника.

Для получения оптимальных характеристик тензочувствительного материала была проведена серия экспериментов по определению влияния концентрации МУНТ на электрофизические и механические свойства композита. Установлено, что при концентрации нанотрубок ниже порога перколяции (около 0,5% масс.) материал имеет высокое сопротивление и низкую стабильность характеристик. При концентрации выше 3% масс. чувствительность снижается вследствие формирования избыточного количества проводящих путей. Оптимальная концентрация МУНТ составляет 1,0-1,5% масс., при которой достигается максимальный коэффициент тензочувствительности при приемлемой стабильности характеристик.

Проведённые исследования показали, что коэффициент тензочувствительности наномодифицированного композита оптимального состава достигает значений $k = 15-25$, что в 7-10 раз превышает показатели традиционных металлических тензорезисторов. Кроме того, полимерная основа обеспечивает повышенную устойчивость к воздействию агрессивных факторов внешней среды (влаги, масла, солевые растворы) и позволяет формировать датчики различной конфигурации методами трафаретной печати или литья.

Основные характеристики разработанных тензочувствительных элементов в сравнении с традиционными металлическими тензорезисторами представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики тензочувствительных элементов

Параметр	Металлический тензорезистор	Наномодифицированный элемент
Коэффициент тензочувствительности	2,0–2,5	15–25
Диапазон измерений, мкм/м	±3000	±10000
Рабочий диапазон температур, °С	-40...+80	-60...+120
Погрешность измерений, %	±1,0	±0,5
Температурный дрейф, %/°С	0,1–0,2	0,01–0,02
Ресурс при циклических нагрузках	10 ⁶ циклов	10 ⁸ циклов
Устойчивость к влаге	Требует герметизации	Высокая

3. Структура автоматизированной системы контроля

Предлагаемая автоматизированная система контроля состояния рельсовых путей (АСК РП) представляет собой многоуровневую распределённую систему, обеспечивающую непрерывный мониторинг НДС контролируемых участков рельсового пути. Система включает следующие основные компоненты: распределённую сеть тензочувствительных элементов; модули первичной обработки и преобразования сигналов; каналы передачи данных; центральный сервер сбора и анализа информации; автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов [6].

Тензочувствительные элементы размещаются в наиболее нагруженных зонах рельсов, определённых на основании расчётного анализа НДС и статистики возникновения дефектов. К таким зонам относятся: область перехода от головки к шейке рельса, где концентрируются напряжения от контактных нагрузок; зона сопряжения шейки и подошвы рельса, подверженная изгибным напряжениям; области сварных стыков, характеризующиеся неоднородностью структуры и свойств металла; зоны болтовых стыков, испытывающие повышенные динамические нагрузки.

Для каждого контролируемого сечения рельса устанавливается группа из 4–6 тензочувствительных элементов, ориентированных вдоль и поперёк оси рельса. Такая конфигурация позволяет определять компоненты тензора деформаций и вычислять главные напряжения в контролируемом сечении. Расстояние между контролируемыми сечениями определяется категорией пути и интенсивностью движения, типичные значения составляют от 25 до 100 метров.

Модули первичной обработки (МПО) обеспечивают усиление сигналов тензочувствительных элементов, фильтрацию помех, аналого-цифровое преобразование с разрешением не менее 16 бит и частотой дискретизации до 1000 Гц, а также первичную обработку данных. Каждый МПО обслуживает группу из 8-16 тензочувствительных элементов. Конструктивно МПО выполнен в герметичном корпусе со степенью защиты IP67, обеспечивающей работоспособность в условиях железнодорожной эксплуатации.

Передача данных от МПО к центральному серверу осуществляется по проводным каналам связи (витая пара, оптоволокно) или по беспроводным каналам (GSM/LTE, радиомодемы). Выбор типа канала определяется условиями конкретного объекта. Для обеспечения надёжности передачи данных применяется протокол с подтверждением доставки и автоматическим повторением при ошибках.

Программное обеспечение системы реализует комплекс алгоритмов анализа НДС, включающий: вычисление компонент напряжений и деформаций по показаниям группы датчиков; спектральный анализ сигналов для выявления характерных частот, связанных с дефектами; сравнение текущих показаний с эталонными значениями и пороговыми уровнями; прогнозирование развития дефектов на основе методов машинного обучения.

При превышении установленных пороговых значений или обнаружении аномальных изменений характеристик система автоматически формирует предупреждающие сообщения для диспетчерского персонала с указанием координат проблемного участка, типа аномалии и рекомендуемых действий.

4. Методика экспериментальных исследований

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного подхода был выполнен комплекс экспериментальных исследований, включающий лабораторные испытания тензочувствительных элементов и полевые испытания прототипа системы на реальном участке железнодорожного пути.

Лабораторные испытания проводились на специализированном стенде, позволяющем моделировать нагружение образцов рельсов статическими и динамическими нагрузками. Стенд включает: силовую раму с гидравлическими цилиндрами грузоподъёмностью до 500 кН; систему управления нагружением; эталонные средства измерения силы и деформаций; многоканальную систему сбора данных.

В качестве объектов испытаний использовались образцы рельсов типа Р65 длиной 1,5 м. На каждый образец устанавливалось 8 наномодифицированных тензочувствительных элементов и 8 эталонных фольговых тензорезисторов для сравнительного анализа. Элементы располагались в зонах шейки и подошвы рельса симметрично относительно середины образца.

Перед установкой тензочувствительных элементов поверхность рельса подвергалась механической обработке и обезжириванию. Элементы фиксировались с помощью специального клеевого состава на основе эпоксидной смолы с последующей термообработкой при температуре 80°C в течение 2 часов для полной полимеризации.

Программа лабораторных испытаний включала: определение статических характеристик (чувствительность, линейность, гистерезис) при нагружении от 0 до 300 кН; исследование частотных характеристик при динамическом нагружении с частотой от 0,1 до 50 Гц; оценку температурной стабильности в диапазоне от -40 до +60°C; ресурсные испытания при циклическом нагружении (10^7 циклов с амплитудой ± 100 кН).

Полевые испытания проводились на экспериментальном участке железной дороги протяжённостью 500 м, расположенном на подъездных путях промышленного предприятия. Участок характеризуется интенсивностью движения до 20 пар поездов в сутки с осевой нагрузкой до 25 тс. На участке было оборудовано 10 контролируемых сечений с общим количеством 48 тензочувствительных элементов.

Критериями оценки эффективности системы являлись: точность измерения деформаций относительно эталонных средств; стабильность характеристик во времени; вероятность обнаружения дефекта; вероятность ложного срабатывания; время наработки на отказ датчиков и модулей системы.

5. Результаты экспериментальных исследований

Результаты лабораторных испытаний показали, что разработанные наномодифицированные тензочувствительные элементы обеспечивают стабильную регистрацию деформаций в диапазоне от 10 до 5000 мкм/м. Статическая характеристика элементов близка к линейной, коэффициент нелинейности не превышает 0,3%. Гистерезис при циклическом нагружении составляет менее 0,2% от диапазона измерений.

Сравнительный анализ показаний наномодифицированных элементов и эталонных фольговых тензорезисторов подтвердил высокую точность измерений. Среднеквадратическое отклонение показаний наномодифицированных элементов от эталонных значений составило 0,7%, максимальное отклонение -1,2%. При этом соотношение сигнал/шум у наномодифицированных элементов в 5-7 раз выше благодаря повышенной чувствительности.

Повышенное соотношение сигнал/шум особенно важно в условиях железнодорожной эксплуатации, где присутствуют значительные электромагнитные помехи от тяговой сети и систем сигнализации. Это позволяет регистрировать малые деформации без применения сложных схем фильтрации.

Температурные испытания показали высокую стабильность характеристик наномодифицированных элементов. Температурный дрейф нуля составил менее 0,02%/°C, что в 5–10 раз меньше, чем у традиционных тензорезисторов. Это обеспечивает возможность эксплуатации без частой перекалибровки в условиях значительных суточных и сезонных колебаний температуры.

Ресурсные испытания в течение 10^7 циклов нагружения не выявили значимой деградации характеристик наномодифицированных элементов. Изменение чувствительности за период испытаний составило менее 2%, дрейф нуля – менее 1%. Для сравнения, эталонные фольговые тензорезисторы показали изменение чувствительности на 5-8% и выход из строя 15% датчиков.

Анализ вышедших из строя фольговых тензорезисторов показал, что основной причиной отказа являлось разрушение токоведущих дорожек в зоне перехода от измерительной решётки к выводам. Наномодифицированные элементы благодаря монолитной структуре чувствительного слоя лишены данного недостатка.

Результаты лабораторных испытаний обобщены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты лабораторных испытаний тензочувствительных элементов

Параметр	Значение
Диапазон регистрируемых деформаций, мкм/м	10–5000
Коэффициент нелинейности, %	$\leq 0,3$
Гистерезис, %	$\leq 0,2$
Погрешность измерений (СКО), %	0,7
Изменение чувствительности после 10^7 циклов, %	< 2

Полевые испытания прототипа АСК РП проводились в течение 6 месяцев в период с апреля по октябрь. За время испытаний система зарегистрировала более 3500 проходов поездов и накопила массив данных объёмом более 50 ГБ. Анализ данных позволил выявить характерные особенности НДС рельсов при проходе поездов различных типов и выявить участки с аномальным поведением.

Среди зарегистрированных поездов преобладали грузовые составы (около 85%) с осевой нагрузкой от 18 до 25 тс. Также фиксировались маневровые локомотивы и специальный подвижной состав. Для каждого типа подвижного состава были определены характерные паттерны деформаций, что позволило создать базу эталонных сигнатур.

В ходе полевых испытаний система своевременно зафиксировала и сигнализировала о развитии двух потенциально опасных дефектов в зоне сварных стыков. Первый дефект был обнаружен на 47-е сутки эксплуатации по характерному изменению спектра деформаций при проходе поезда. Второй дефект выявлен на 112-е сутки по нарастающей асимметрии показаний датчиков, расположенных по разные стороны от стыка. Оба дефекта были впоследствии подтверждены методами ультразвуковой дефектоскопии и устранены при плановом ремонте.

Динамика нарастания асимметрии позволила спрогнозировать достижение критического уровня дефекта и определить допустимый срок эксплуатации участка до проведения ремонта. Прогноз оправдался с точностью до 5 суток.

6. Новизна и область применения результатов

Научная новизна работы заключается в следующем. Разработан состав наномодифицированного композиционного материала на основе эпоксидной матрицы с многостенными углеродными нанотрубками, обеспечивающий коэффициент тензочувствительности 15-25 при оптимальной концентрации наполнителя 1,0-1,5% масс. Предложена методика размещения и калибровки тензочувствительных элементов на рельсовом пути, обеспечивающая определение компонент тензора напряжений в контролируемых сечениях. Разработаны алгоритмы анализа данных тензометрического мониторинга для выявления и прогнозирования развития дефектов рельсов на основе спектрального анализа и методов машинного обучения.

Практическая значимость работы определяется возможностью внедрения разработанной системы для обеспечения безопасности движения на участках железных дорог с повышенными требованиями к надёжности. К таким участкам относятся: высокоскоростные магистрали, где высокие скорости движения предъявляют повышенные требования к состоянию пути; искусственные сооружения (мосты, путепроводы, тоннели), где затруднено проведение регулярных обследований; участки с интенсивным грузовым движением, испытывающие повышенные нагрузки; участки со сложными климатическими условиями.

Применение разработанной системы позволит перейти от периодического контроля к непрерывному мониторингу состояния рельсовой инфраструктуры, что обеспечит своевременное обнаружение развивающихся дефектов, снижение риска аварийных ситуаций, оптимизацию планирования ремонтных работ на основе фактического состояния пути, снижение эксплуатационных расходов за счёт перехода к обслуживанию по состоянию.

Заключение

В работе рассмотрена актуальная проблема контроля и диагностики состояния рельсовой инфраструктуры и предложен подход к её решению на основе тензометрических комплексов с использованием наномодифицированных чувствительных элементов. Проведён анализ существующих методов контроля рельсовых путей, выявлены их ограничения, обосновывающие необходимость разработки систем непрерывного мониторинга.

Показано, что применение многостенных углеродных нанотрубок в составе полимерной матрицы позволяет создать тензочувствительные элементы с характеристиками, существенно превосходящими традиционные металлические тензорезисторы: коэффициент тензочувствительности выше в 7-10 раз, температурный дрейф ниже в 5-10 раз, ресурс при циклических нагрузках выше на два порядка.

Разработана структура автоматизированной системы контроля состояния рельсовых путей, включающая распределённую сеть датчиков, модули первичной обработки данных, каналы связи и программное обеспечение для анализа и прогнозирования состояния пути. Проведены комплексные лабораторные и полевые экспериментальные исследования, подтвердившие работоспособность и эффективность предложенного подхода.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование алгоритмов анализа данных с применением методов глубокого обучения, расширение номенклатуры диагностируемых дефектов, разработку методов самодиагностики датчиков и проведение расширенных эксплуатационных испытаний на объектах магистральной железнодорожной сети.

Библиографические ссылки

1. Марков, А. А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. В 2 кн. Кн. 1. Дефекты рельсов. Методы и технические средства / А. А. Марков, Е. А. Шур. – Санкт-Петербург : ФГУП НИИАС, 2018. – 316 с.

2. Горелик, А. В. Методы и средства измерений и контроля в системе технического обслуживания инфраструктуры железнодорожного транспорта / А. В. Горелик, Е. Ю. Тарадин, М. Ю. Савченко // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 2. – С. 14–23.

3. Кузнецов, С. М. Современные методы неразрушающего контроля рельсов / С. М. Кузнецов, В. А. Петров // Дефектоскопия. – 2019. – № 8. – С. 42–51.

4. Федотов, А. И. Наномодифицированные полимерные композиции для изготовления тензорезистивных датчиков / А. И. Федотов, В. Н. Смирнов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 45–51.

5. Amjadi, M. Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review / M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, M. Sitti // Advanced Functional Materials. – 2016. – Vol. 26, № 11. – P. 1678–1698.

6. Hodge, V. J. Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey / V. J. Hodge, S. O'Keefe, M. Weeks, A. Moulds // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 16, № 3. – P. 1088–1106.

© Назаров И. В., 2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОМЫШЦ НА УДЕРЖАНИЕ СВОБОДНО ПОДВЕШЕННОЙ НАГРУЗКИ

И. В. Назаров, Т. Г. Орешенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: 17.inxx@gmail.com

В статье рассматривается проблема определения характеристик пневматических искусственных мышц при удержании свободно подвешенной нагрузки. Объектом исследования являются пневмомышцы собственного изготовления различной номинальной длины. Представлены результаты экспериментальных исследований несущей способности пневматических мышц при различных значениях подвешенной нагрузки. Установлено, что пневмомышцы независимо от номинальной длины способны выдерживать нагрузку до 22 кг при рабочем давлении 0,3–0,8 МПа. Выявлены ограничения конструкции, связанные с прочностью крепления. Область применения результатов – мягкая робототехника, протезирование и реабилитационные устройства.

Ключевые слова: пневматические искусственные мышцы, пневмомышцы, удержание нагрузки, несущая способность, мягкая робототехника, приводы одностороннего действия, система управления, биомиметика.

Тенденции современного развития техники направлены на увеличение удельных нагрузок, снижение габаритных и весовых характеристик, расширение функциональных возможностей, повышение надёжности выпускаемой продукции на базе новых информационных технологий. Благодаря созданию высокомодульных высокопрочных волоконных материалов оказались возможными новые подходы к решению актуальных вопросов инженерного проектирования. Использование физических свойств такого доступного строительного материала, как воздух, открыло доступ к созданию перспективных проектов на стыке наук: физики, химии, механики, кибернетики. Таким проектом явились предварительно напряжённые мягкие оболочечные конструкции [1].

Актуальность темы обусловлена необходимостью создания безопасных, энергоэффективных и адаптивных систем, способных взаимодействовать с человеком и динамичной окружающей средой. В этом контексте пневматические мышцы (ПМ), или пневматические искусственные мышцы (ПИМ), становятся ключевым элементом мягкой робототехники. Пневматические искусственные мышцы представляют собой одну из наиболее перспективных технологий в сфере гибких приводных систем и биомиметических решений. Их конструкция и принцип действия имитируют работу биологических мышц, что делает такие приводы особенно актуальными в конструкциях, где важны безопасность, мягкость взаимодействия и высокая адаптивность [2].

В условиях стремительного развития робототехники, бионики и автоматизированных систем, технология пневмомышц приобретает всё большее значение, поскольку она способна обеспечить тот уровень гибкости и функциональности, который трудно достичь с использованием традиционных приводных решений. Проблема исследования заключается в определении максимальной несущей способности пневмомышц при удержании свободно подвешенной нагрузки, что является критически важным параметром для проектирования робототехнических систем и реабилитационных устройств.

Целью данной работы является экспериментальное исследование способности пневматических мышц собственного изготовления удерживать свободно подвешенную нагрузку различной массы и определение предельных характеристик разработанной конструкции.

1. Анализ существующих приводных систем

Исторически основоположником технологии пневматических мышц стала мышца Маккиббена, разработанная в 1950-х годах американским инженером Джозефом Лоунсом при участии исследователя Маккиббена. Изначально она предназначалась для использования в протезировании конечностей ветеранов Второй мировой войны. Несмотря на успешные первые эксперименты, технология долгое время оставалась на периферии научных исследований из-за ограничений материалов и систем управления. Лишь с развитием современных композитов, высокоточных датчиков и интеллектуальных систем управления пневматические мышцы получили новую жизнь и стали основой инновационных разработок [3].

В сравнении с другими современными приводами пневмомышцы обладают рядом уникальных преимуществ. Электромоторы, включая сервоприводы, ценятся за высокую точность позиционирования (до $\pm 0,01$ мм) и энергоэффективность (КПД 60-90%). Они широко применяются в робототехнике, станках с ЧПУ и микроэлектронной сборке. Однако, несмотря на точность и распространённость, они имеют ограниченные возможности в области гибкости и безопасности: требуют сложных систем редукции и часто увеличивают массу конструкции, что ограничивает возможности для портативных и носимых устройств. При столкновении или сбое в управлении могут представлять опасность для человека [4].

Гидравлические системы, напротив, обеспечивают исключительную мощность (до 10 МПа) и применяются в тяжёлой промышленности, строительной технике и авиации. Такие системы используют жидкости, часто токсичные или агрессивные, которые могут загрязнить окружающую среду при нарушении герметичности. Также гидросистемы, несмотря на высокую мощность, имеют большую инерцию из-за физической плотности рабочей жидкости и особенностей передачи давления, что ограничивает скорость их реакции.

Приводы на основе умных материалов, таких как пьезоэлектрики и материалы с эффектом памяти формы (SMA), страдают от ограниченного диапазона рабочих температур, медленной обратимости и высокой стоимости производства. Приводы на основе SMA (например, никелида титана) предлагают компактность и бесшумность, но их КПД не превышает 5-10%, а скорость отклика крайне низка (1-10 секунд). Это сужает их применение до узких задач, таких как микроактуация в оптике или медицинских имплантатах.

Пневматические мышцы выгодно отличаются от всех перечисленных технологий своим простым принципом действия, высокой энергетической эффективностью при малой массе, возможностью создания компактных и лёгких систем. Они демонстрируют хорошее соотношение мощности к весу (до 500 Н/кг) и способны развивать значительные тяговые усилия при низком энергопотреблении. Ключевыми преимуществами также являются надёжность и безопасность. Пневмомышцы работают на сжатом воздухе, который доступен, безопасен и не представляет угрозы окружающей среде. В случае утечки из пневмосистемы происходит всего лишь выход воздуха в атмосферу [5].

Сравнительные характеристики различных типов приводов представлены в таблице 1.

Сравнительная характеристика различных типов приводов

Критерий	Пневмо-мышцы	Электро-моторы	Гидрав-лика	SMA
Сила/масса, Н/кг	до 500	100–300	≥ 1000	10-50
Точность, мм	$\pm 1-5$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1-1$	$\pm 0,5-2$
КПД, %	30-40	60-90	20-30	5-10
Безопасность	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая
Стоимость внедрения	Низкая	Средняя	Высокая	Средняя

2. Устройство и принцип действия пневматических мышц

В основу Пневматическая искусственная мышца представляет собой пневматический привод, конструктивно выполненный в виде герметичной эластичной оболочки, заключённой в плетёную армирующую структуру. В основу работы пневмомускула заложено свойство мембраны (тонкой двухмерной эластичной структуры) изменять свою форму или размеры при воздействии избыточного давления в её внутренней полости. Данный принцип позволяет преобразовывать энергию сжатого воздуха в механическую работу сокращения, аналогично биологическим мышцам живых организмов [6].

Конструктивно пневмомышца состоит из следующих основных элементов: внутренней эластичной мембраны (камеры), внешней армирующей оболочки и концевых фитингов для подключения к пневмосистеме и крепления к механизму. Внутренняя мембрана изготавливается из эластомерных материалов – натурального или синтетического каучука, силикона, латекса. Она должна обладать высокой эластичностью, способностью выдерживать многократные деформации без разрушения и обеспечивать герметичность при рабочем давлении.

Внешняя армирующая оболочка выполняет функцию формирования направления деформации и ограничения радиального расширения мембраны. В пневмомускулах германской фирмы «FESTO» использована мембрана цилиндрической формы с твёрдым дном и крышкой. Избыточное давление воздуха или жидкости вызывает увеличение диаметра оболочки пневмомускула и уменьшение её длины. Таким образом, избыточное давление внутри пневмомускула преобразуется в усилие его сокращения. В зависимости от своей конструкции пневмомускул может иметь одно или два отверстия для его присоединения к пневмосистеме [7].

Способность цилиндрической мембраны укорачиваться при создании в её внутренней полости избыточного давления определяется особенностью плетения корда. Нить корда изготавливается из недеформируемого синтетического материала – вентрана, кевлара, тварена, технора или карбона. Эти материалы обладают высоким модулем упругости и минимальным удлинением при растяжении, что обеспечивает стабильность геометрических характеристик армирующей оболочки. После пропитки корда эластомером, например хлоропреном, образуется упругая стенка пневмомускула, обладающая высокой эластичностью и прочностью на разрыв.

Цилиндрическая структура мембраны образована путём винтообразной перекрёстной навивки нитей корда. Шаг навивки строго регламентирован и определяет угол наклона нитей относительно продольной оси мышцы (угол плетения). После заполнения корда эластомером в местах переплетения нитей формируются ромбовидные ячейки с узлами-шарнирами. Угол плетения является ключевым конструктивным параметром, определяющим соотношение между сокращением мышцы и развиваемым усилием. Типичные значения угла плетения составляют 20–30 градусов в исходном состоянии.

Избыточное давление во внутренней полости цилиндрической мембраны увеличивает внутренний радиус мембраны, а в узлах ромбовидной ячейки возникают окружные и осевые усилия, вызывающие удлинение одной диагонали и укорачивание другой. Механизм работы подобен сокращению биологической мышцы: при утолщении мышца раз-

вивает тянущее усилие, и кости, к которым она прикреплена, по мере её осевого сокращения подтягиваются друг к другу. Тянущее усилие, развиваемое шланговыми пневмодвигателями, может в несколько раз превышать усилие, развиваемое поршневыми пневмоцилиндрами такого же диаметра.

Статическая характеристика пневматической мышцы описывается зависимостью развиваемого усилия от величины сокращения при постоянном давлении. При нулевом сокращении (начальной длине) усилие максимально, а по мере укорачивания мышцы усилие уменьшается и достигает нуля при максимальном сокращении (обычно 20–30% от начальной длины). Данная характеристика является нелинейной и зависит от конструктивных параметров мышцы: диаметра, длины, угла плетения армирующей оболочки.

Необходимо отметить, что оболочковый мускул данного типа, как и природный прообраз, является приводом одностороннего действия – то есть работающим исключительно на сокращение. При подаче внутрь оболочки воздуха под давлением создаётся сила, направленная на уменьшение линейного размера мышцы, но обратного процесса не происходит. Для возврата системы в исходное «расслабленное» состояние, а также для возможности двухсторонней работы привода, чаще всего применяются схемы, в которых мышцы делают парными – то есть антагонистами. В такой паре одна мышца отвечает за сжатие, а её антагонист – за растяжение. Альтернативным решением является использование пружинного возврата или силы тяжести нагрузки.

Динамические характеристики пневматических мышц определяются скоростью нарастания давления в камере, инерционностью подвижных масс и вязким трением в системе. Время срабатывания типичных пневмомышц составляет 50–200 мс, что существенно меньше, чем у приводов на основе SMA (1-10 с), но больше, чем у электромагнитных приводов (1-10 мс). Частотный диапазон работы пневмомышц ограничен 5-10 Гц для малых типоразмеров и 1–3 Гц для крупных мышц [9].

Технические характеристики промышленных пневматических мускулов (на примере DMSP FESTO, Германия) включают: номинальную длину от 30 до 9000 мм; подъёмную силу от 0 до 6000 Н; типоразмеры 5, 10, 20, 40 мм; длину хода от 0 до 2250 мм; максимальное сокращение от 20 до 25% от номинальной длины; максимальную дополнительную нагрузку, свободно подвешенную, от 5 до 250 кг; теоретическое усилие при максимальном допустимом рабочем давлении от 140 до 6000 Н; рабочее давление от 0 до 0,8 МПа; температуру окружающей среды от -5 до +60°C.

Пневмомышцы требуют источника сжатого газа (обычно воздуха). Рабочее давление составляет 0,3-0,8 МПа, что обусловлено ограниченной прочностью используемых материалов. Давление может создаваться воздушным компрессором или использоваться от баллона со сжатым воздухом через редуктор. Преимуществом пневматического привода является отсутствие необходимости в обратном трубопроводе – отработанный воздух выпускается в атмосферу.

3. Объект и методика экспериментального исследования

Объектом исследования являются пневмомышцы собственного изготовления. Каждая мышца состоит из двух основных компонентов: мягкой эластичной внутренней резиновой трубки и плетёного ячеистого рукава из полиэстера (кабельной оплётки). Когда во внутреннем пузыре создаётся повышенное давление, он надувается и растягивает ячеистый рукав изнутри, увеличивая диаметр рукава.

Для корректной работы важно, чтобы мышца в неактивном положении была растянута или находилась под нагрузкой. В противном случае она просто расширится. Таким образом, мышца должна находиться в нормально растянутом состоянии для того, чтобы произвести работу при сокращении. При сокращении пневмомышцы её диаметр увеличивается пропорционально сокращению длины, поэтому пневмомускул сокращается примерно на 20-30% своей длины.

В ходе предварительных исследований было изготовлено несколько опытных образцов пневмомускулов. Первый образец с внешним диаметром резиновой трубки 5 мм и ячеистого рукава диаметром 12 мм при номинальной длине обеих составляющих 100 мм показал неудовлетворительные результаты. При нагнетании давления до 0,8 МПа в мышце с данными геометрическими размерами наблюдалась потеря герметичности, связанная с перекручиванием мембраны мускулы внутри ячеистого рукава. Таким образом, было принято решение в дальнейшем использовать резиновую трубку диаметром 7 мм и оплётку диаметром 10 мм.

После изготовления второго образца с длиной 100 мм было установлено, что пневмомускула способна сокращаться на 28 мм, что эквивалентно 28% от номинальной длины. Следующий образец был изготовлен в количестве 10 штук для использования непосредственно в прототипе кисти руки. Номинальная длина каждой искусственной мышцы составила 400 мм. Испытания показали, что образец при подаче давления даёт максимальное сокращение 112 мм, что соответствует 28% от номинальной длины. После изменения геометрических размеров и конструкции прототипа кисти руки был изготовлен четвёртый образец пневмомышцы длиной 200 мм, который способен сжиматься на 64 мм, что также эквивалентно 28% от данной номинальной длины.

Результаты исследования сокращения образцов пневмомускулов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сокращение образцов пневмомускулов в зависимости от геометрических размеров

Номер образца	Диаметр мембраны, мм	Диаметр рукава, мм	Длина, мм	Сокращение, мм	Сокращение, %
1	5	12	100	-	-
2	7	10	100	28	28
3	7	10	400	112	28
4	7	10	200	64	28

Таким образом, было установлено, что для эффективной работы пневмомускулы необходимо оптимальное соотношение диаметров мембраны и ячеистого рукава. Сокращение мышцы в процентном соотношении не зависит от длины самой искусственной мускулы и составляет около 28% при оптимальных геометрических параметрах.

4. Методика испытаний на удержание свободно подвешенной нагрузки

Для исследования способности пневмомышц удерживать дополнительную свободно подвешенную нагрузку была разработана специальная методика испытаний, основанная на стандартных подходах к определению грузоподъёмности пневматических приводов. Целью испытаний являлось определение максимальной массы груза, которую пневмомышца способна удерживать в статическом режиме при номинальном рабочем давлении без потери работоспособности [10].

В качестве нагрузки использовались гантели с набором дисков-утяжелителей, позволяющих плавно изменять массу подвешенного груза с шагом 0,5-2 кг. Применение стандартизированных грузов обеспечило точность измерения массы и воспроизводимость результатов. Масса груза контролировалась взвешиванием на электронных весах с погрешностью не более ± 10 г.

Испытательный стенд включал следующие компоненты: жёсткую раму для вертикального закрепления пневмомышцы; верхний узел крепления с возможностью регулировки положения; нижний узел подвеса нагрузки с карабином для быстрой смены груза; воздушный компрессор производительностью не менее 50 л/мин для создания рабочего давления; ресивер объёмом 10 л для стабилизации давления; манометр класса точности 1,5 для контроля давления в системе; пневмораспределители с электромагнитным управлением для подачи и сброса давления; соединительные шланги и фитинги.

Рабочее давление в системе поддерживалось в диапазоне 0,3-0,8 МПа в соответствии с техническими требованиями к пневмомышцам данного типоразмера. Для основной серии испытаний было выбрано максимальное рабочее давление 0,8 МПа, обеспечивающее наибольшее развиваемое усилие. Контроль давления осуществлялся непрерывно в течение всего эксперимента для выявления возможных утечек.

Процедура испытаний включала следующие этапы. На первом этапе осуществлялась подготовка образца: визуальный осмотр пневмомышцы на отсутствие видимых дефектов, проверка герметичности при минимальном давлении 0,1 МПа, установка образца в вертикальное положение на испытательном стенде, подключение к пневмосистеме. На втором этапе проводилась предварительная нагрузка: подача рабочего давления 0,8 МПа, выдержка под давлением без нагрузки в течение 60 секунд для стабилизации системы, подвешивание начальной нагрузки массой 2 кг.

На третьем этапе выполнялось ступенчатое нагружение: после успешного удержания начальной нагрузки масса увеличивалась на 2-4 кг; пневмомышца выдерживалась под каждой ступенью нагрузки не менее 30 секунд; в процессе выдержки контролировались показания манометра, положение груза и состояние мышцы; при отсутствии признаков отказа нагрузка увеличивалась до следующей ступени.

На четвёртом этапе определялся момент отказа. Критериями отказа являлись: разгерметизация пневмосистемы (характеризуется падением давления и характерным звуком выхода воздуха); разрушение элементов крепления (отсоединение фитингов, разрыв хомутов); разрыв мембраны или армирующей оболочки; невозможность удержания груза (медленное опускание груза при номинальном давлении).

В исследовании использовались образцы пневмомышц двух номинальных длин: 100 мм и 200 мм. Оба типа образцов имели одинаковые геометрические параметры поперечного сечения: диаметр внутренней мембраны 7 мм и диаметр ячеистого рукава 10 мм. Такой выбор позволил оценить влияние длины пневмомышцы на её несущую способность при сохранении остальных конструктивных параметров.

Для обеспечения достоверности результатов каждое испытание повторялось не менее трёх раз на разных образцах одного типоразмера. Результаты считались достоверными, если разброс значений максимальной нагрузки не превышал 15%. Условия проведения испытаний: температура окружающей среды $20\pm 5^\circ\text{C}$, относительная влажность 40-70%, атмосферное давление 84-106 кПа.

Дополнительно фиксировались следующие параметры: время удержания нагрузки на каждой ступени; характер деформации мышцы под нагрузкой (величина сокращения, изменение диаметра); наличие и локализация утечек воздуха; вид и место отказа при достижении предельной нагрузки. Данные параметры позволяли провести анализ режимов работы пневмомышцы и выявить слабые элементы конструкции.

5. Результаты экспериментальных исследований

Проведённые испытания показали высокую несущую способность разработанных пневмомышц. Пневмомышца длиной 100 мм успешно выдержала испытания с нагрузкой массой 6 кг, продемонстрировав стабильную работу при полном рабочем давлении. При увеличении нагрузки до 22 кг (с учётом массы грифа и фиксаторов гантели) мышца также успешно удерживала груз без видимых признаков деформации или потери давления.

Пневмомышца длиной 200 мм была испытана с нагрузкой массой 18 кг. Испытания показали, что удлинённый образец также способен эффективно удерживать значительную нагрузку, что подтверждает независимость несущей способности от номинальной длины мышцы при сохранении параметров поперечного сечения.

Установлено, что пневмомышцы независимо от номинальной длины способны выдерживать нагрузку до 22 кг. При подвешивании большей массы происходит разгерметизация пневмосистемы в связи с недостаточной прочностью крепления хомута на нип-

пеле. Данный элемент конструкции является критическим и лимитирует измеряемую несущую способность системы. Таким образом, из-за такого недостатка конструкции не представляется возможным измерить максимальное усилие пневмомышцы, которое, вероятно, превышает полученные экспериментальные значения.

Результаты испытаний пневмомышц на удержание свободно подвешенной нагрузки представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний пневмомышц на удержание нагрузки

№ испытания	Длина, мм	Нагрузка, кг	Давление, МПа	Результат
1	100	6	0,8	Успешно
2	100	14	0,8	Успешно
3	100	22	0,8	Успешно
4	200	10	0,8	Успешно
5	200	18	0,8	Успешно
6	100, 200	>22	0,8	Разгерметизация

Анализ результатов показывает, что разработанные пневмомышцы демонстрируют высокую несущую способность, сопоставимую с промышленными образцами аналогичного типоразмера. Полученные значения (до 22 кг) находятся в пределах характеристик пневмомышц FESTO типоразмера 10 мм, для которых максимальная дополнительная нагрузка составляет от 5 до 25 кг в зависимости от рабочего давления.

6. Новизна и область применения результатов

Научная новизна работы заключается в следующем. Во-первых, экспериментально установлена несущая способность пневмомышц собственного изготовления на основе резиновой мембраны и полиэстерового ячеистого рукава, которая составляет не менее 22 кг при рабочем давлении 0,3-0,8 МПа. Во-вторых, выявлен критический элемент конструкции – крепление хомута на ниппеле, – который лимитирует измеряемую грузоподъемность и определяет направление дальнейшего совершенствования конструкции. В-третьих, показано, что несущая способность пневмомышцы не зависит от её номинальной длины при сохранении параметров поперечного сечения, что важно для проектирования систем различного масштаба.

Практическая значимость результатов определяется возможностью их применения при разработке систем управления на базе пневматических мышц для различных областей техники. К основным областям применения относятся: мягкая робототехника, где пневмомышцы используются в качестве исполнительных механизмов манипуляторов и захватных устройств; протезирование конечностей, где важны естественность движений и безопасность взаимодействия с человеком; реабилитационные экзоскелеты для восстановления двигательных функций после травм и заболеваний; промышленная автоматизация в задачах, требующих мягкого взаимодействия с хрупкими объектами.

Полученные данные позволяют обоснованно выбирать параметры пневмомышц для конкретных задач манипулирования объектами. Например, для захвата объектов массой до 2–3 кг (типичные бытовые предметы) достаточно одной пневмомышцы разработанной конструкции с многократным запасом прочности. Для более тяжёлых объектов возможно использование групповых схем с несколькими параллельно работающими мышцами.

Заключение

В работе представлены результаты комплексного экспериментального исследования пневматических искусственных мышц на удержание свободно подвешенной нагрузки.

Проведён сравнительный анализ различных типов приводных систем, подтвердивший перспективность применения пневматических мышц в задачах, требующих высокого соотношения силы к массе, безопасности и адаптивности.

Разработана и апробирована методика изготовления пневмомышц на основе резиновой мембраны и полиэстерового ячеистого рукава. Установлено, что оптимальное соотношение диаметров мембраны (7 мм) и рукава (10 мм) обеспечивает стабильную работу мышцы с сокращением около 28% от номинальной длины.

Экспериментально подтверждено, что пневмомышцы независимо от номинальной длины способны выдерживать нагрузку до 22 кг при рабочем давлении 0,3-0,8 МПа. Выявлен критический элемент конструкции – крепление хомута на ниппеле, – разгерметизация которого ограничивает измеряемую несущую способность системы.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование системы крепления для определения истинного максимального усилия пневмомышц, исследование долговечности при циклических нагрузках, разработку интеллектуальных алгоритмов управления с обратной связью по датчикам давления и положения, а также расширение области применения разработанных пневматических приводов в робототехнике, протезировании и реабилитационной медицине.

Библиографические ссылки

1. Колесникова, Е. Г. Гибкие приводы в робототехнике / Е. Г. Колесникова, Е. А. Савинская, В. И. Умнов // Механика и машиностроение. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – 9 с.
2. Жетенбаев, Н. Т. Исследование и применение пневматических искусственных мышц / Н. Т. Жетенбаев, Е. С. Нургизат, Г. К. Балбаев, Б. Т. Шингисов, Г. Д. Естемесова. – Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, 2021. – 8 с.
3. Chou, C.-P. Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles / C.-P. Chou, B. Hannaford // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1996. – Vol. 12, № 1. – P. 90–102.
4. Драгунов, С. Е. Автоматизация проектирования персонифицированных активных экзоскелетов нижних конечностей / С. Е. Драгунов. – ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – 165 с.
5. Daerden, F. Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation / F. Daerden, D. Lefeber // European Journal of Mechanical and Environmental Engineering. – 2002. – Vol. 47, № 1. – P. 11-21.
6. Andrikopoulos, G. A Survey on Applications of Pneumatic Artificial Muscles / G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, S. Manesis // Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control and Automation. – Corfu, Greece, 2011. – P. 1439-1446.
7. Tondu, B. Modelling of the McKibben artificial muscle: A review / B. Tondu // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2012. – Vol. 23, № 3. – P. 225-253.

© Назаров И. В., Орешенко Т. Г., 2026

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПНЕВМОМЫШЦАХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Т. Г. Орешенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: veisver@mail.ru

Рассматривается проблема обеспечения обратной связи в пневматических искусственных мышцах робототехнических устройств. Объектом исследования являются нанокompозитные тензочувствительные материалы на основе полимерных матриц с наноразмерными наполнителями (углеродные нанотрубки, графен, MXene). Достигнутый уровень исследований позволяет создавать многослойные оболочки пневмомышц, интегрирующие функции механической защиты и сенсорики. Новизна результатов состоит в разработке подхода к созданию «интеллектуальных» пневмоприводов с интегрированной самодиагностикой без применения внешних датчиков. Область применения охватывает робототехнику, биомедицинские экзоскелеты, промышленную автоматизацию и протезирование.

Ключевые слова: нанокompозитные материалы, тензочувствительность, пневматические искусственные мышцы, углеродные нанотрубки, графен, MXene, интегрированная сенсорика, робототехника, самодиагностика, мягкие приводы.

Пневматические искусственные мышцы (ПИМ) представляют собой один из наиболее перспективных типов приводов для современных робототехнических систем. В отличие от традиционных электромеханических приводов, ПИМ обладают уникальным сочетанием характеристик: высоким соотношением мощности к массе (до 10 кВт/кг), природной податливостью, безопасностью при взаимодействии с человеком и способностью имитировать биологические мышечные движения. Эти свойства делают пневмомышцы особенно привлекательными для применения в сервисной робототехнике, медицинских экзоскелетах, реабилитационном оборудовании и протезировании [1].

Мировой рынок мягкой робототехники, ключевым компонентом которой являются пневматические приводы, демонстрирует устойчивый рост. По прогнозам аналитиков, к 2028 году его объём превысит 6 миллиардов долларов США при среднегодовом темпе роста более 30%. Основными драйверами развития являются потребности медицинской отрасли в безопасных реабилитационных устройствах, промышленности – в адаптивных захватных механизмах, а также растущий интерес к коллаборативным роботам, способным безопасно работать рядом с человеком [2].

Вместе с тем традиционные конструкции ПИМ имеют существенный недостаток – отсутствие встроенной обратной связи по положению, скорости и развиваемому усилию. Для реализации замкнутого контура управления требуется применение внешних датчиков: энкодеров, тензодатчиков, датчиков давления, что значительно усложняет конструкцию, увеличивает массу и стоимость системы, а также снижает её надёжность. Данное обстоятельство существенно ограничивает практическое применение пневмомышц в автономных мобильных роботах и носимых устройствах, где критичны массогабаритные характеристики.

Целью настоящей работы является анализ перспектив использования нанокompозитных тензочувствительных материалов для создания оболочек пневматических искусственных мышц со встроенной сенсорной функцией, позволяющей реализовать концепцию «интеллектуального» привода с интегрированной самодиагностикой.

1. Конструкция и принцип работы пневматических искусственных мышц

Пневматическая искусственная мышца в классическом исполнении (мышца Маккиббена) представляет собой эластичную герметичную камеру, заключённую в армирующую оплётку из нерастяжимых нитей. При подаче сжатого воздуха внутренняя камера стремится расшириться радиально, однако оплётка, выполненная под определённым углом к продольной оси, преобразует радиальное расширение в осевое сокращение. Величина сокращения может достигать 25–40% от начальной длины, а развиваемое усилие – нескольких килоньютонеров при рабочем давлении 0,3–0,6 МПа [3].

Конструктивно оболочка ПИМ состоит из двух основных компонентов: внутренней эластичной камеры (bladder), обеспечивающей герметичность, и внешней армирующей оплётки (braid), определяющей механическое поведение мышцы. В качестве материала камеры традиционно используются латекс, силикон или термопластичные эластомеры (ТПЭ). Оплётка выполняется из синтетических волокон – полиэтилентерефталата (ПЭТ), нейлона, кевлара или углеродных волокон. Угол укладки нитей оплётки относительно продольной оси определяет соотношение между радиальным и осевым перемещениями и составляет обычно 20–30 градусов.

Принцип работы ПИМ основан на энергетическом балансе между работой давления воздуха и работой внешней нагрузки. При увеличении давления в камере система стремится минимизировать потенциальную энергию, что при ограничениях, накладываемых оплёткой, выражается в сокращении мышцы. Математическая модель идеализированной ПИМ описывается соотношением между развиваемым усилием F , давлением P , начальной длиной L_0 , диаметром D_0 и текущей относительной деформацией ε . Реальное поведение мышцы отличается от идеальной модели наличием гистерезиса, нелинейностью характеристик и зависимостью от скорости деформирования.

Указанные особенности существенно затрудняют точное управление положением и усилием ПИМ в разомкнутом контуре. Для построения эффективной системы управления необходима информация о текущем состоянии мышцы: степени сокращения, развиваемом усилии, давлении в камере. Традиционный подход предполагает использование внешних датчиков, размещаемых на звеньях манипулятора или в пневматической магистрали, что увеличивает сложность системы и снижает её надёжность.

2. Нанокompозитные тензочувствительные материалы

Перспективным решением проблемы обратной связи является интеграция сенсорной функции непосредственно в материал оболочки пневмомышцы. Это становится возможным благодаря применению нанокompозитных материалов с тензочувствительными свойствами. Такие материалы представляют собой полимерную матрицу (эластомер, силикон, термопластичный полиуретан) с диспергированными наноразмерными проводящими наполнителями [4].

В качестве наполнителей используются различные нанокompозитные материалы: одностенные и многостенные углеродные нанотрубки (УНТ), графен и его производные (оксид графена, восстановленный оксид графена), углеродные нановолокна, а также проводящие наночастицы металлов и MXene – двумерные карбиды и нитриды переходных металлов. Каждый тип наполнителя обладает специфическим комплексом свойств, определяющим характеристики результирующего композита.

Механизм тензочувствительности нанокompозитов основан на изменении электропроводности материала при деформации. При концентрации наполнителя выше порога

перколяции (обычно 0,5–3% по массе в зависимости от типа и формы частиц) в материале формируется проводящая сеть из контактирующих или туннельно связанных наночастиц. При деформации материала расстояние между частицами изменяется, что приводит к разрыву части контактов при растяжении (увеличение сопротивления) или образованию новых контактов при сжатии (уменьшение сопротивления). Данный механизм обеспечивает существенно более высокую чувствительность по сравнению с традиционными металлическими тензорезисторами, работающими на принципе изменения геометрии проводника [5].

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются наиболее изученным типом наполнителя для тензочувствительных композитов. Многостенные УНТ (МУНТ) диаметром 10–50 нм и длиной 1–10 мкм обеспечивают низкий порог перколяции (0,5–1,5% масс.) благодаря высокому аспектному отношению. Композиты на основе эластомеров с МУНТ демонстрируют коэффициент тензочувствительности (gauge factor) $k = 10–50$, что в 5–25 раз превышает показатели металлических тензорезисторов ($k \approx 2$). При этом сохраняется высокая эластичность материала с допустимой деформацией до 100% и более.

Графен и его производные представляют особый интерес благодаря двумерной структуре и высокой удельной поверхности. Графеновые нанопластины обеспечивают формирование разветвлённой проводящей сети при относительно низких концентрациях. Композиты с графеном характеризуются хорошей линейностью характеристик и меньшим гистерезисом по сравнению с УНТ-композитами. Коэффициент тензочувствительности достигает $k = 20–100$ при деформациях до 50%.

MXene ($Ti_3C_2T_x$ и др.) – относительно новый класс двумерных материалов, привлекающий внимание исследователей благодаря высокой электропроводности, гидрофильности и возможности функционализации поверхности. MXene-содержащие композиты демонстрируют рекордные значения тензочувствительности ($k > 100$ в отдельных работах) и хорошую воспроизводимость характеристик. Недостатком является склонность MXene к окислению на воздухе, требующая применения защитных покрытий [6].

3. Конструкции оболочек пневмомышц с интегрированной сенсорикой

Интеграция нанокompозитных тензочувствительных материалов в конструкцию ПИМ может осуществляться несколькими способами. Наиболее перспективным является создание многослойных оболочек, в которых различные слои выполняют специализированные функции: герметизации, сенсорики и механического армирования.

Типовая конструкция многослойной оболочки включает три основных слоя. Внутренний слой выполняется из чистого эластомера (силикон, латекс) и обеспечивает герметичность камеры. Толщина слоя составляет 0,5–1,5 мм в зависимости от рабочего давления. Средний слой представляет собой нанокompозит на основе эластомерной матрицы с проводящим наполнителем (УНТ, графен, MXene). Этот слой выполняет сенсорную функцию – изменение его электрического сопротивления регистрируется измерительной схемой и используется для определения деформации оболочки. Толщина сенсорного слоя обычно составляет 0,1–0,5 мм. Внешний слой – армирующая оплётка из синтетических или углеродных волокон, определяющая механическое поведение мышцы при надуве [7].

Для съёма электрического сигнала с сенсорного слоя применяются различные конструкции электродов. Простейший вариант – кольцевые электроды на торцах мышцы, обеспечивающие измерение интегрального сопротивления слоя вдоль продольной оси. Более информативной является конфигурация с несколькими парами электродов, позволяющая определять распределение деформации по длине мышцы. Перспективным направлением является создание распределённых электродных структур методами печатной электроники, что позволяет получать детальную карту деформационного состояния оболочки.

Технологии изготовления многослойных оболочек включают несколько основных подходов. Метод послойного литья предполагает последовательное нанесение слоёв на цилиндрическую оправку с промежуточной полимеризацией каждого слоя. Преимуществом метода является возможность точного контроля толщины слоёв и их адгезии. Метод окунания заключается в многократном погружении оправки в жидкие полимерные композиции с промежуточной сушкой. Метод обеспечивает хорошую однородность слоёв, но менее точен по толщине. Текстильный метод предполагает плетение или вязание оболочки из волокон, предварительно покрытых нанокompозитом. Данный подход позволяет интегрировать сенсорную функцию непосредственно в армирующую структуру.

Альтернативным подходом является нанесение тензочувствительных покрытий на готовую оболочку пневмомышцы методами напыления, трафаретной печати или прямого написания (*direct ink writing*). Данные методы позволяют формировать сенсорные элементы произвольной конфигурации на поверхности эластичных подложек и легко масштабируются для серийного производства.

4. Сравнительный анализ характеристик материалов

Выбор оптимального состава нанокompозита для сенсорного слоя оболочки ПИМ определяется комплексом требований: высокая тензочувствительность, широкий диапазон деформаций, линейность характеристик, малый гистерезис, температурная стабильность, ресурс при циклических нагрузках, технологичность и стоимость. В таблице 1 представлены сравнительные характеристики основных типов нанокompозитов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики нанокompозитных тензочувствительных материалов

Параметр	МУНТ	Графен	MXene	Металлич. тензорез.
Кэф. тензочувствительности, k	10–50	20–100	50–150	2–2,5
Макс. деформация, %	>100	50–80	30–50	1–3
Порог перколяции, % масс.	0,5–1,5	1–3	1–5	–
Гистерезис, %	5–15	3–8	2–5	<1
Ресурс, циклы	>10 ⁶	>10 ⁵	>10 ⁵	10 ⁶
Относит. стоимость	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая

Анализ данных таблицы показывает, что композиты на основе МУНТ представляют оптимальный компромисс между тензочувствительностью, диапазоном деформаций и стоимостью. Графеновые и MXene-композиты обеспечивают более высокую чувствительность, однако имеют ограничения по максимальной деформации и более высокую стоимость. Для приложений, требующих экстремальной чувствительности при умеренных деформациях, предпочтительны композиты с MXene.

5. Функциональные возможности интеллектуальных пневмоприводов

Интеграция тензочувствительного нанокompозитного слоя в оболочку ПИМ открывает возможности для реализации ряда функций, недоступных традиционным конструкциям пневмоприводов. Комплекс этих функций позволяет говорить о создании нового класса устройств – интеллектуальных пневматических приводов, способных не только выполнять силовые функции, но и осуществлять мониторинг собственного состояния и взаимодействия с внешней средой.

Ключевой является функция самоизмерения (*self-sensing*) – определение текущего состояния мышцы по изменению электрического сопротивления сенсорного слоя. При деформации оболочки изменяется геометрия проводящей сети нанокompозита, что приводит к пропорциональному изменению электрического сопротивления. Регистрируя это

изменение с помощью измерительного моста или иной схемы, можно определить степень сокращения мышцы с точностью до долей процента. Дифференцирование сигнала по времени позволяет оценивать скорость деформации, а двойное дифференцирование – ускорение. Данная информация может использоваться в замкнутом контуре управления для точного позиционирования без применения внешних датчиков положения.

Функция оценки нагрузки (force estimation) реализуется на основе анализа соотношения между давлением в камере и измеренной деформацией. Для идеальной мышцы без нагрузки существует однозначное соответствие между давлением и деформацией, описываемое статической характеристикой. При наличии внешней нагрузки деформация при том же давлении будет меньше. Зная характеристику мышцы, по величине отклонения от ожидаемой деформации можно оценить внешнюю нагрузку. Точность оценки зависит от стабильности характеристики мышцы и точности измерения деформации, в современных реализациях достигает 5–10% от диапазона измерения.

Данная функция критически важна для обеспечения безопасности при взаимодействии робота с человеком. В отличие от жёстких приводов, пневмомышцы обладают естественной податливостью, однако при высоком давлении способны развивать значительные усилия. Контроль усилия в реальном времени позволяет ограничивать воздействие на оператора безопасным уровнем и реализовывать режимы импедансного управления, при которых робот «уступает» внешнему воздействию подобно биологической мышце.

Функция диагностики состояния (health monitoring) основана на мониторинге характеристик сенсорного слоя во времени. В процессе эксплуатации пневмомышцы неизбежно происходят деградационные процессы: накопление усталостных повреждений в материале, ослабление адгезии между слоями, микроразрывы в проводящей сети нанокompозита, старение эластомера под действием ультрафиолета и озона. Эти изменения проявляются в эволюции электрических характеристик сенсорного слоя: изменении базового сопротивления, увеличении шума, дрейфе показаний, изменении формы импульсного отклика.

Алгоритмы обработки сигналов, основанные на статистическом анализе и методах машинного обучения, позволяют выявлять такие изменения на ранней стадии, задолго до критического отказа, и прогнозировать остаточный ресурс мышцы. Это даёт возможность перейти от регламентного обслуживания по наработке к обслуживанию по фактическому состоянию (condition-based maintenance), что особенно важно для ответственных применений в медицине и авиации, где отказ привода может привести к серьёзным последствиям.

Функция обнаружения контакта (contact detection) реализуется благодаря чувствительности нанокompозита к локальным деформациям. При касании внешним объектом поверхности мышцы в точке контакта возникает локальное изменение напряжённо-деформированного состояния. Если объект оказывает давление на оболочку, происходит локальное сжатие материала с соответствующим уменьшением сопротивления в этой зоне. Применение нескольких пар электродов или распределённых электродных структур позволяет не только фиксировать факт контакта, но и определять его координаты и интенсивность.

Данная функция востребована в захватных устройствах и манипуляторах, где необходимо определять момент контакта с объектом манипулирования и распределение контактного давления. В сочетании с функцией оценки нагрузки это позволяет реализовывать адаптивный захват с автоматической подстройкой усилия под свойства объекта – мягкий захват хрупких предметов и более жёсткий для тяжёлых грузов.

Дополнительной функцией является температурная компенсация. Электрическое сопротивление нанокompозита зависит не только от деформации, но и от температуры. Однако характер температурной зависимости отличается от деформационной, что по-

зволяет при использовании многоканальной схемы измерения разделять эти влияния. Более того, сам сенсорный слой может использоваться в качестве датчика температуры, предоставляя дополнительную информацию о тепловом состоянии привода.

6. Области применения и перспективы развития

Интеллектуальные пневмоприводы с интегрированной сенсорикой на основе нанокompозитных материалов имеют широкий спектр потенциальных применений, охватывающий медицину, промышленность, сервисную робототехнику и научные исследования. Рассмотрим основные направления более подробно.

Медицинская робототехника и реабилитация представляют одну из наиболее перспективных областей применения. Экзоскелеты для реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата требуют приводов, способных обеспечивать мягкое, контролируемое воздействие на конечности пациента. Пневмомышцы идеально подходят для этой задачи благодаря естественной податливости, а интегрированная сенсорика позволяет точно дозировать усилие и отслеживать движения пациента. Самодиагностика привода обеспечивает безопасность, исключая риск травмирования при отказе или деградации характеристик [8].

Важным направлением является создание активных ортезов для компенсации утраченных функций при параличах, парезах, мышечной дистрофии. Такие устройства должны работать синхронно с сохранившейся мышечной активностью пациента, что требует прецизионного контроля усилий и положения. Интегрированные датчики позволяют реализовать режим «ассистирования» – привод добавляет усилие к собственным движениям пациента, не подавляя и не опережая их.

В протезировании пневмомышцы с интегрированными датчиками могут использоваться для создания активных протезов конечностей нового поколения. Ключевым преимуществом является возможность обеспечения естественной обратной связи по усилию через вибротактильные или электростимуляционные интерфейсы. Пользователь протеза получает возможность ощущать силу захвата, жёсткость удерживаемого предмета, момент контакта с поверхностью. Это существенно улучшает функциональность протеза и снижает когнитивную нагрузку на пользователя, позволяя выполнять манипуляции более естественно и интуитивно.

Промышленная автоматизация представляет ещё одну крупную область применения. Адаптивные захватные устройства на основе интеллектуальных пневмоприводов способны безопасно манипулировать широким спектром объектов – от хрупких стеклянных изделий до тяжёлых металлических заготовок. Встроенная сенсорика позволяет автоматически идентифицировать свойства объекта (массу, жёсткость, форму) и подбирать оптимальные параметры захвата. Это особенно важно в условиях гибкого производства, где номенклатура изделий часто меняется.

Интеллектуальные пневмоприводы перспективны для коллаборативных роботов (коботов), работающих в непосредственной близости от людей. Традиционные промышленные роботы с жёсткими приводами требуют установки защитных ограждений для предотвращения травм. Пневмомышцы с интегрированным контролем усилия позволяют создавать роботов, безопасных при физическом контакте с человеком. При столкновении такой робот не наносит травму, а «мягко» уступает воздействию, ограничивая усилие безопасным уровнем.

Сервисная робототехника представляет растущий рынок для интеллектуальных приводов. Роботы-ассистенты для помощи пожилым людям и людям с ограниченными возможностями должны обеспечивать безопасное физическое взаимодействие при выполнении бытовых задач: помощь при вставании, поддержка при ходьбе, перемещение предметов. Пневмоприводы с интегрированной сенсорикой позволяют создавать робо-

тов с «мягким» контактом, способных адекватно реагировать на непредвиденные ситуации.

Научные исследования в области биомеханики и нейрофизиологии также могут использовать интеллектуальные пневмоприводы. Способность точно контролировать и измерять усилия и перемещения делает такие приводы идеальными для изучения двигательных функций человека, тестирования ортопедических изделий, моделирования мышечной активности.

Дальнейшее развитие технологии связано с несколькими ключевыми направлениями. Совершенствование составов нанокompозитов направлено на повышение стабильности характеристик во времени, снижение гистерезиса при циклическом нагружении и расширение температурного диапазона эксплуатации. Перспективным является применение гибридных наполнителей, сочетающих преимущества различных наноматериалов – например, УНТ для обеспечения высокой эластичности и графена для снижения гистерезиса.

Разработка технологий изготовления ориентирована на масштабируемость и снижение себестоимости производства. Переход от лабораторных методов к промышленным технологиям (экструзия, непрерывное литьё, рулонная печать) позволит существенно снизить стоимость интеллектуальных пневмоприводов и сделать их доступными для массового применения.

Развитие методов обработки сигналов и алгоритмов машинного обучения позволит повысить точность самодиагностики и прогнозирования состояния приводов. Нейросетевые модели способны выявлять сложные паттерны в сигналах датчиков, недоступные для традиционных методов анализа, и обеспечивать более раннее обнаружение дегенерационных процессов.

Миниатюризация является важным направлением для медицинских применений. Создание микромасштабных пневмоприводов с интегрированной сенсорикой откроет возможности для разработки новых типов хирургических инструментов, катетеров с активным управлением, имплантируемых устройств.

Заключение

В работе рассмотрены перспективы применения нанокompозитных тензочувствительных материалов для создания оболочек пневматических искусственных мышц со встроенной сенсорной функцией. Проведён анализ существующих конструкций ПИМ и выявлена актуальная проблема – отсутствие встроенной обратной связи, требующее применения внешних датчиков.

Показано, что нанокompозиты на основе полимерных матриц с углеродными нанотрубками, графеном и MXene обеспечивают тензочувствительность, в 5–50 раз превышающую показатели традиционных металлических тензорезисторов, при сохранении высокой эластичности материала. Это делает возможным создание многослойных оболочек ПИМ, интегрирующих функции герметизации, сенсорики и механического армирования.

Описаны функциональные возможности интеллектуальных пневмоприводов: самоизмерение деформации, оценка нагрузки, диагностика состояния и обнаружение контакта. Определены перспективные области применения: медицинская робототехника, протезирование, промышленная автоматизация, сервисная робототехника.

Результаты работы свидетельствуют о высоком потенциале рассмотренного подхода для создания нового поколения пневматических приводов робототехнических систем с расширенными функциональными возможностями.

Библиографические ссылки

1. Daerden, F. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation / F. Daerden, D. Lefeber // *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*. – 2002. – Vol. 47, № 1. – P. 11–21.
2. Polygerinos, P. Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction / P. Polygerinos, N. Correll, S. A. Morin [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 19, № 12. – P. 1700016.
3. Chou, C. P. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles / C. P. Chou, B. Hannaford // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1996. – Vol. 12, № 1. – P. 90–102.
4. Amjadi, M. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review / M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, M. Sitti // *Advanced Functional Materials*. – 2016. – Vol. 26, № 11. – P. 1678–1698.
5. Федотов, А. И. Наномодифицированные полимерные композиции для изготовления тензорезистивных датчиков / А. И. Федотов, В. Н. Смирнов // *Вестник машиностроения*. – 2021. – № 5. – С. 45–51.
6. Yan, Y. Soft wearable sensors based on MXenes: Fabrication strategies, sensing mechanisms, and applications / Y. Yan, T. Yan, J. Wang [et al.] // *Materials Horizons*. – 2025. – Vol. 12, № 3. – P. 612–648.
7. Wang, H. Self-sensing soft pneumatic actuator using carbon nanotube-polymer composite / H. Wang, J. Totaro, L. Beccai // *Advanced Materials Technologies*. – 2023. – Vol. 8, № 15. – P. 2300289.
8. Cianchetti, M. Biomedical applications of soft robotics / M. Cianchetti, C. Laschi, A. Menciassi, P. Dario // *Nature Reviews Materials*. – 2018. – Vol. 3, № 6. – P. 143–153.

© Орешенко Т. Г., 2026

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ПОДВОДА ДОЗВУКОВОЙ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ

А. А. Кишкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко, Д. В. Васимов, Н. В. Мовчан

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
e-mail: gift_23j@mail.ru

Теоретический анализ исходных уравнений закрученных течений в проточной части подводящего устройства микротурбины показывает, что формирование базы данных для коэффициента потерь по перепаду полного давления недостаточно для разбалансировки уравнения энергии на входе в рабочее колесо турбины. Следует дополнить объем экспериментальных исследований для формирования параллельной базы данных для коэффициента окружной составляющей абсолютной скорости.

Ключевые слова: тангенциальные подводящие устройства, рабочее колесо турбины, коэффициент потерь, окружная скорость, геометрические и режимные параметры.

Для разработки математической модели и алгоритма расчета центростремительной микротурбины применяющейся для утилизации тепловой мощности космических аппаратов необходимо оценивать окружную составляющую абсолютной скорости на радиусе входа в рабочее колесо (РК) турбины. Теоретический анализ суммарных потерь потока как суперпозиция внезапного расширения с последующим вихревым течением до рабочего колеса представляет теоретически неопределенную задачу, для предварительной оценки и формирования базы данных потерь на этом участке необходимо использовать данные экспериментальных продувок с регистрацией энергетических и скоростных параметров потока на участке: 0 – параметры во входном канале устройства; 1 – параметры на входном диаметре во входном канале устройства. Для обработки экспериментальных данных помимо коэффициента потерь энергии ζ_{01} удобно воспользоваться коэффициентом окружной составляющей скорости φ_u [1].

Обоснуем некоторые соображения определяющие содержание коэффициента окружной составляющей скорости. Расчетная экспериментальная схема представлена на рис. 1.

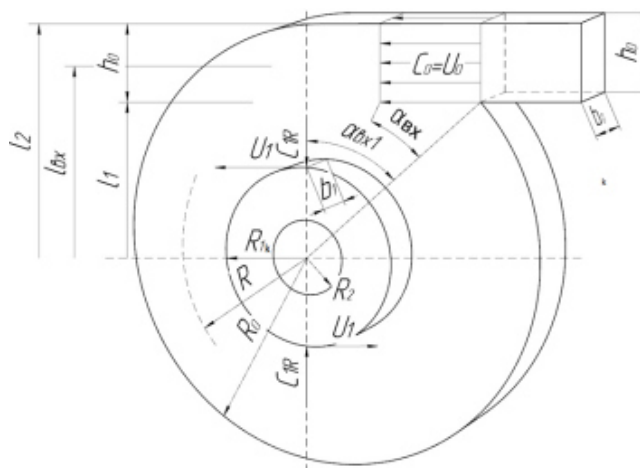


Рис. 1. Расчетная схема момента количества движения

Определим массовый расход в подводящем канале:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = C_0 \cdot h_0 \cdot b_0, \quad (1)$$

где ρ – плотность; C_0 – расходная скорость в канале; h_0 – высота канала; b_0 – ширина.

Допустим, что $C_0 = \text{const}$ по высоте h_0 , плечо момента количества движения по h_0 изменяется от l_1 до l_2 , тогда момент количества движения во входном сечении запишется как интеграл:

$$M_0 = \int_{l_1}^{l_2} \rho \cdot C_0^2 \cdot l \cdot b_0 \cdot dl = \rho \cdot C_0 \cdot h_0 \cdot b_0 \cdot C_0 \frac{l^2}{2} \Big|_{l_1}^{l_2}. \quad (2)$$

Подставим пределы интегрирования $l_2 = R_0$; $l_1 = R_0 - h_0$ и учтем (1):

$$M_0 = \dot{m} \cdot C_0 \cdot \frac{1}{2} (l_2^2 - l_1^2),$$

$$M_0 = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot C_0 (2R_0 h_0 - h_0^2) = \dot{m} \cdot C_0 h_0 \left(R_0 - \frac{h_0}{2} \right). \quad (3)$$

Теоретический момент количества движения на текущем радиусе R :

$$M_T = \dot{m} \cdot U_T \cdot R, \quad (4)$$

где \dot{m} массовый расход определяется выражением:

$$\dot{m} = 2\pi R \cdot b \cdot C_R \cdot \rho. \quad (5)$$

Для идеального случая, когда нет момента сил трения, моменты M_0 и M_T равны:

$$M_0 = M_T.$$

Подставив выражения для моментов (2.43), получаем:

$$\dot{m} \cdot C_0 \cdot h_0 \left(R_0 - \frac{h_0}{2} \right) = \dot{m} \cdot U_T \cdot R. \quad (6)$$

Продолжим преобразование выразим значения окружной составляющей на текущем радиусе, через параметры во входном канале:

$$U_T = \frac{C_0 h_0}{R} \left(R_0 - \frac{1}{2} h_0 \right); \quad (7)$$

или с учетом:

$$R_0 = l_{ex} + \frac{h_0}{2},$$

$$U_T = \frac{C_0 h_0}{R} \cdot l_{ex}. \quad (8)$$

Для радиуса входа в рабочее колесо R_1 при отсутствии потерь:

$$U_{1T} = \frac{C_0 h_0}{R_1} \cdot l_{вх}. \quad (9)$$

Коэффициент окружной составляющей скорости определяется:

$$\varphi_u = \frac{U_{1\partial}}{U_{1T}}, \quad (10)$$

где $U_{1\partial}$ - действительное (измеренное) значение, U_{1T} – максимально теоретически возможное [2].

Действительное значение окружной скорости рассчитывается как среднее по результатам измерений полного и статического давлений и температуры по периферии рабочего колеса микротурбины в 4 точках окружности R_1 (рис. 2).

Общий вид сборки представлен на рис. 2. На рисунке показана подводка к термисторам, приемники давления не подключены к измерительным трубкам датчиков давлений [3].

Предварительная оценка окружной скорости на входе в РК микротурбины необходимо для возможности использовать уравнения энергии по периферии РК:

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{C_0^2}{2} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{C_1^2}{2} + \zeta_c \cdot \frac{C_0^2}{2}, \quad (11)$$

где ζ_c – коэффициент потерь полного напора в сопле; абсолютная скорость на входе в РК:

$$C_1^2 = U_1^2 + C_{R1}^2, \quad (12)$$

расходная составляющая определяется только расчетно:

$$C_{R1} = \frac{\dot{m}}{\rho_1 F_1}, \quad (13)$$

где \dot{m} – массовый расход рабочего тела, ρ_1 – плотность на входе в РК, F_1 – площадь проходного сечения в РК.

Коэффициент скорости представляет собой параметр, рассчитанный непосредственно по результатам измерений без дополнительных допущений.

По результатам эксперимента в диапазоне изменений геометрических и режимных параметров подводящего устройства микротурбины: h_0 – высота канала; $l_{вх}$ – среднее плечо момента количества движения; R_1 – радиус входа в рабочее колесо; Re – число Рейнольдса на входе, реализуется возможность формирования базы данных для φ_u с целью использования при математическом моделировании и проектировании микротурбины [4].

Использование баз данных по коэффициенту окружной составляющей скорости φ_u (10) и коэффициенту потерь полного давления ζ_c (11) позволяет однозначно определить

полное давление на входе в РК микротурбины при математическом моделировании и проектировании, а также проводить оптимизацию в диапазоне изменений режимных и геометрических параметров микротурбины [5].

Алгоритм обработки экспериментальных данных испытаний тангенциальных, спиральных и кольцевых подводов, реализован в виде программного алгоритма, позволяющего по замерам в 0 (канальном подводе) и 1 сечении (по периферии рабочего колеса), значений давлений, температур и расчетных скоростей определять энергетические параметры подводящего устройства: ζ_c – коэффициент потерь и φ_u – коэффициент скорости (10). Скрин блока управления программы показан на рис.3.



Рис. 2. Общий вид сборки

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	Исходные данные:																						
2	Точка 0		p (полное)	121775 Pa	Точка 2			p (полное)	105536 Pa	Точка 3			p (полное)	99766 Pa	Геометрия		h_0	0,006 m	Примечания				
3			p^* (стат)	103710 Pa				p^* (стат)	99450 Pa				p^* (стат)	96831 Pa			b_0	0,0035 m					
4			T_{izm} (C)	19,67 C				T_{izm} (C)	21,14 C				T_{izm} (C)	21,13 C			R_1	0,05 m					
5																	$d_{r.э}$	0,00517096 m					
6																	$f_{вх}$	0,039					
7																	R_{1k}	0,024 m					
8	Результаты расчета:																						
9	Точка 0		p (полное)	121775 Pa	Точка 2			p (полное)	105536 Pa	Точка 3			p (полное)	99766 Pa	Расходные		m	0,00401485 kg/s					
10			p^* (стат)	103710 Pa				p^* (стат)	99450 Pa				p^* (стат)	96831 Pa			C_{1R}	6,49063096 m/s					
11			k	1,4				k	1,4				k	1,4			C_1	85,7395344 m/s					
12			$2/k-1$	5				$2/k-1$	5				$2/k-1$	5			Потери		$k/k-1$	3,5			
13			p_{poln}/P_{st}	1,174188				p_{poln}/P_{st}	1,061197				p_{poln}/P_{st}	1,030311			p_0/p_0-p_1	7368,7605					
14			M	0,484746				M	0,292683				M	0,207082			$C_{02}/2-C_{12}$	9628,84722					
15			T_{izm} (C)	19,67 C				T_{izm} (C)	21,14 C				T_{izm} (C)	21,13 C			----	35419,509					
16			T_{izm} (K)	292,97 K				T_{izm} (K)	294,44 K				T_{izm} (K)	294,43 K			ζ_{C1}	9,63629952					
17			T_{stat}	281,0813 K				T_{stat}	289,9688 K				T_{stat}	292,1747 K			ζ_{C0}	2,66222401					
18			t_f	0,955114				t_f	0,983156				t_f	0,991496			Кэф. Скор		$CuIT$	265,074123 m/s			
19			T^*	294,291 K				T^*	294,9368 K				T^*	294,6806 K			φ_u	0,32252679					
20			ρ	1,282475 kg/m3				ρ	1,192102 kg/m3				ρ	1,151945 kg/m3			Re		v_0	1,51E-05 m2/s			
21			$\Delta\epsilon$	0,058745				$\Delta\epsilon$	0,021416				$\Delta\epsilon$	0,010721			v_1	1,52E-05 m2/s					
22			C_0	163,1225 m/s				C_2	99,98224 m/s				C_3	71,00477 m/s			Re_0	55972,84					
23																	$Re_{\omega 1}$	281142,19					
24								Среднее	C_{1u} cp	85,49351								ω_1	1709,87011 rad/s				
25									p_1 cp	1,172024													
26									p_1 cp	102651													
27									T_1 cp	294,435 K													
28																							
29																							

Рис.3. Блок управления программы расчета энергетических характеристик подводящего устройства

Библиографические ссылки

1. Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЧАСТИЧНО-БАЛАНСОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТИХОХОДНЫХ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ ТУРБИН // В сборнике: Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика. Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2024. С. 31-36.

2. О. В. Шилкин, Ю.Н. Шевченко, А. В. Делков, А. А. Кишкин, П. А. Снетков, Абдуллаев М.У. РАДИАЛЬНО-ОКРУЖНОЙ ПОТОК В МИКРОТУРБИНЕ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 1. С. 124-133.

3. Kishkin A. A., Delkov A. V., Shevchenko Yu. N. CHARACTERISTICS OF THE HEAT CARRIERS IN THE TWO-PHASE CIRCUIT OF THE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS SYSTEMS // В сборнике: Эволюция науки и техники: глобальные вызовы и перспективы. Сборник статей II Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 82-86.

4. Кишкин А. А. Органический цикл Ренкина в автономной теплоэнергетической системе : монография / А. А. Кишкин, О. В. Шилкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко и.др. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – 234 с.

5. Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, А. А. Кишкин, К. И. Капушак, Прототипирование микротурбогенератора и постановка задачи исследования // в сборнике: материалов Всероссийской научно-практической конференции «Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика», г. Красноярск., 2023. С. 17-21.

© Кишкин А. А., Делкова В., Шевченко Ю. Н.,
Васимов Д. В., Мовчан Н. В., 2026

ОТРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЛИНЕЙНЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ В СРЕДЕ SIMINTECH

А.В. Чубарь, М.С. Загайнов, Е.Б. Юрова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,
E-mail: michaelzagainoff@yandex.ru, ekaterinayurova205@yandex.ru

Аннотация: В работе рассматривается отработка алгоритмов позиционного управления линейными перемещениями по осям X, Y и Z на примере цифровой модели кинематики 3D-принтера в среде SimInTech. Предложена структура замкнутого контура с ПИД-регулятором, динамической моделью привода (двигатель постоянного тока), звеньями инерционности механической части и учетом временной задержки. Показан подход к настройке коэффициентов ПИД-регулятора с применением встроенного оптимизатора SimInTech и сформулированы прямые показатели качества переходного процесса для количественной оценки результатов настройки. Результаты моделирования позволяют обосновать параметры регулятора, обеспечивающие требуемую точность позиционирования и быстроедействие при ограничении перерегулирования.

Ключевые слова: линейное перемещение, ПИД-регулятор, оптимизация параметров, SimInTech, привод, 3D-принтер, переходный процесс, показатели качества.

Отработка алгоритмов линейных перемещений является критическим этапом при разработке систем управления координатными механизмами (CNC-станки, 3D-принтеры, манипуляторы). Цифровое моделирование позволяет исследовать влияние динамики привода и механической части, а также задержек и ограничений, на точность позиционирования и устойчивость замкнутого контура. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech поддерживает структурное построение моделей, обмен сигналами через базу сигналов и инструменты анализа, что делает ее удобной для отработки алгоритмов управления до внедрения на объекте.

Цель работы – разработать и исследовать модель линейного перемещения осей X, Y и Z в SimInTech, а также выполнить настройку ПИД-регуляторов с применением оптимизатора и оценить качество регулирования по прямым показателям переходного процесса.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается контур позиционного управления каждой осью 3D-принтера. Каналы X, Y и Z выполнены по идентичной структуре и отличаются только параметрами звеньев. Модель построена из типовых функциональных блоков SimInTech и включает: формирование задания, сравнение с измеренным положением, ПИД-регулятор, динамическую модель привода и механики, а также блок учета времени реакции. Регистрируемые сигналы записываются в базу сигналов для последующего анализа.

Для настройки регуляторов применяется параметрическая оптимизация: коэффициенты ПИД-регулятора (K_p , K_i , K_d) задаются как оптимизируемые параметры, а целевая функция формируется по ошибке положения $e(t) = x_{ref}(t) - x(t)$.

Структура системы линейного перемещения

Структурная схема канала управления осью (рис. 1) включает следующие элементы. Сигнал задания управляющие_x_in (аналогично управляющие_y_in и управляющие_z_in) поступает на формирующее звено (предварительный фильтр), после чего

сравнивается с сигналом обратной связи – текущим положением. Разность формирует ошибку $e(t)$, которая подается на ПИД-регулятор. Выход регулятора воздействует на модель привода (ДПТ) с передаточной функцией вида $K/(s(Ts+1))$, описывающей интегрирование скорости в положение и первый порядок динамики. Далее учитывается механический редуктор и инерционность подвижных узлов. Для приближения модели к реальному объекту вводится блок временной задержки, моделирующий суммарное время реакции датчиков, электроники и механики. Сигнал результирующее_x_out используется как выход оси и возвращается в обратную связь, обеспечивая отрицательную обратную связь и подавление возмущений.

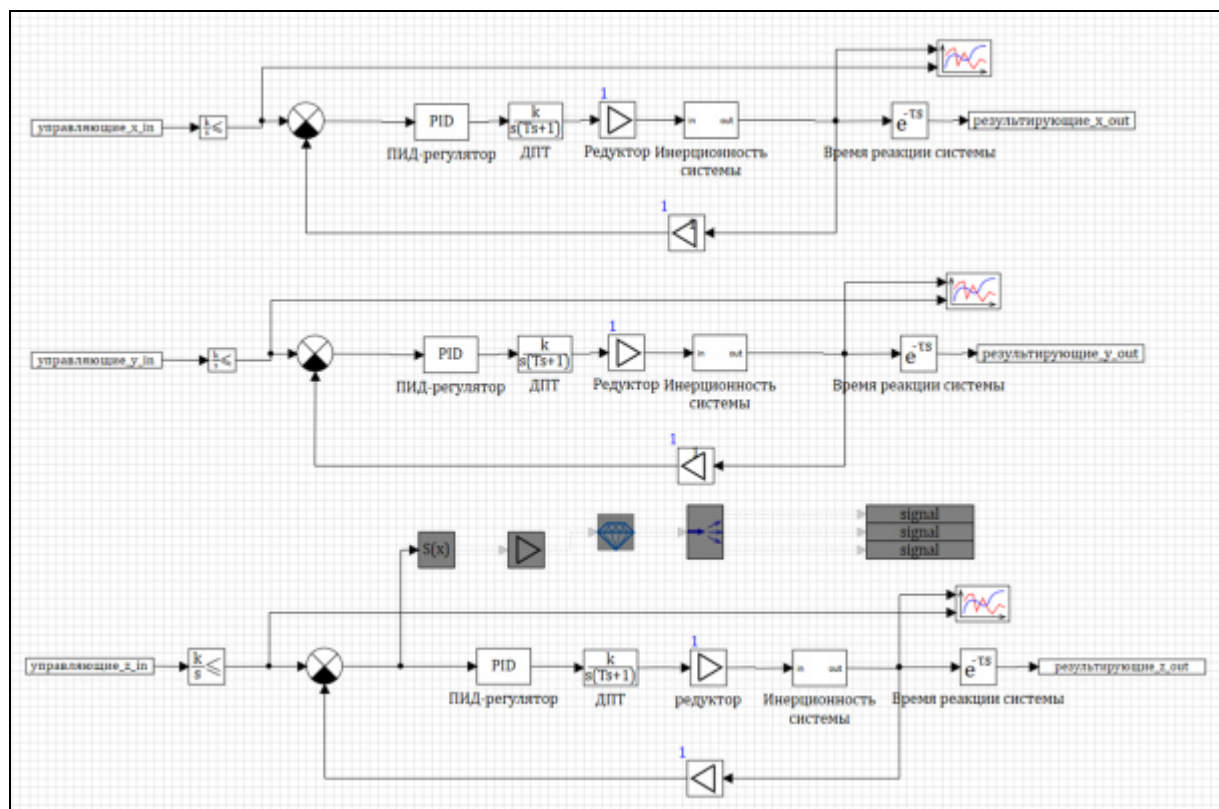


Рис. 1. Структурная схема канала линейного перемещения

Настройка ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса и с помощью оптимизатора

Практика моделирования показывает, что ручная настройка ПИД-регулятора в системах позиционирования может быть трудоемкой из-за наличия интегрирующих звеньев, задержек и различной инерционности механики. В SimInTech предусмотрены средства поиска параметров, в том числе блок «Оптимизатор» библиотеки «Анализ и оптимизация», реализующий итерационные методы (например, метод наискорейшего спуска) для подбора коэффициентов по заданному критерию. Для начала настроим ПИД регулятор методом Циглера-Никольса. Для этого эмпирически найдём значение граничного коэффициента и периода колебаний.

Граничный коэффициент равен 1,982, а период колебаний равен 0,447 с. Тогда значения параметров ПИД-регулятора рассчитываются по формулам:

$$K_p = 0.6 \cdot K_n^*; K_i = 1.2 \cdot \frac{K_n^*}{T^*} \text{ и } K_d = 0.075 \cdot K_n^* \cdot T^*.$$

В результате получаем: $K_p = 1.189$; $K_i = 5.321$ и $K_d = 0.066$. Кривая регулирования примет вид, показанный на рис. 2.

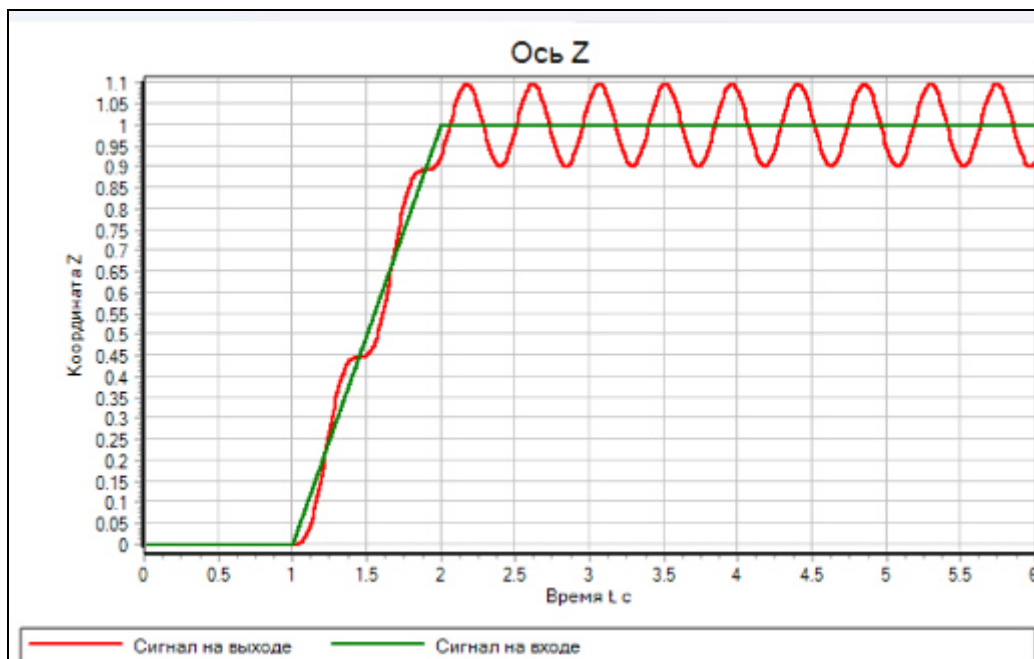


Рис. 2. Графики сигнала задания и выхода при предельном коэффициенте K_u (устойчивые автоколебания)

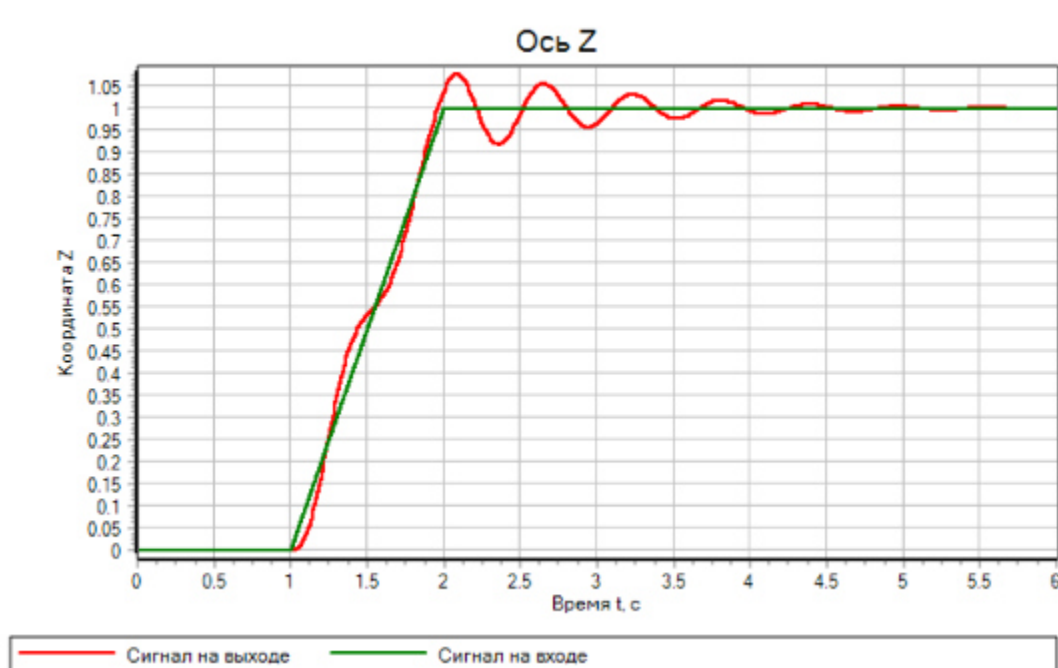


Рис. 3. Графики сигнала задания и выхода после настройки методом Циглера–Никольса

Теперь оптимизируем параметры ПИД-регулятора с помощью блока «Оптимизатор». На рис. 4 представлены параметры оптимизатора.

Название	Имя	Формула	Значение
Минимальные значения выходов блока	umin		[0.01, 0.01, 0.01]
Максимальные значения выходов блока	umax		[10, 10, 1]
Абсолютная точность подбора значений выходов	yabserror		[0.001, 0.001, 0.001]
Начальное приближение выходов блока	x0		[0.1, 0.1, 0.1]
Тип суммарного критерия оптимизации	usumtype		Аддитивный
Минимальные значения входных критериев оп...	umin	0.001	[0.001]
Максимальные значения входных критериев оп...	umax	10	[10]
Выдача информации о процессе оптимизации	printopti...		<input checked="" type="checkbox"/> Да
Периодичность анализа критериев оптимизаци...	optstep		1
Режим оптимизации параметров	optmode		По полному переходному процессу
Метод оптимизации	optmethod		Симплекс
Максимальное количество повторных моделиро...	maxiter		100000
Выставить начальную точку вручную	manualp...		<input type="checkbox"/> Нет
Начальное приращение выходов	dparams	3#0.01	[0.01, 0.01, 0.01]

Рис. 4. Параметры блока «Оптимизатор»

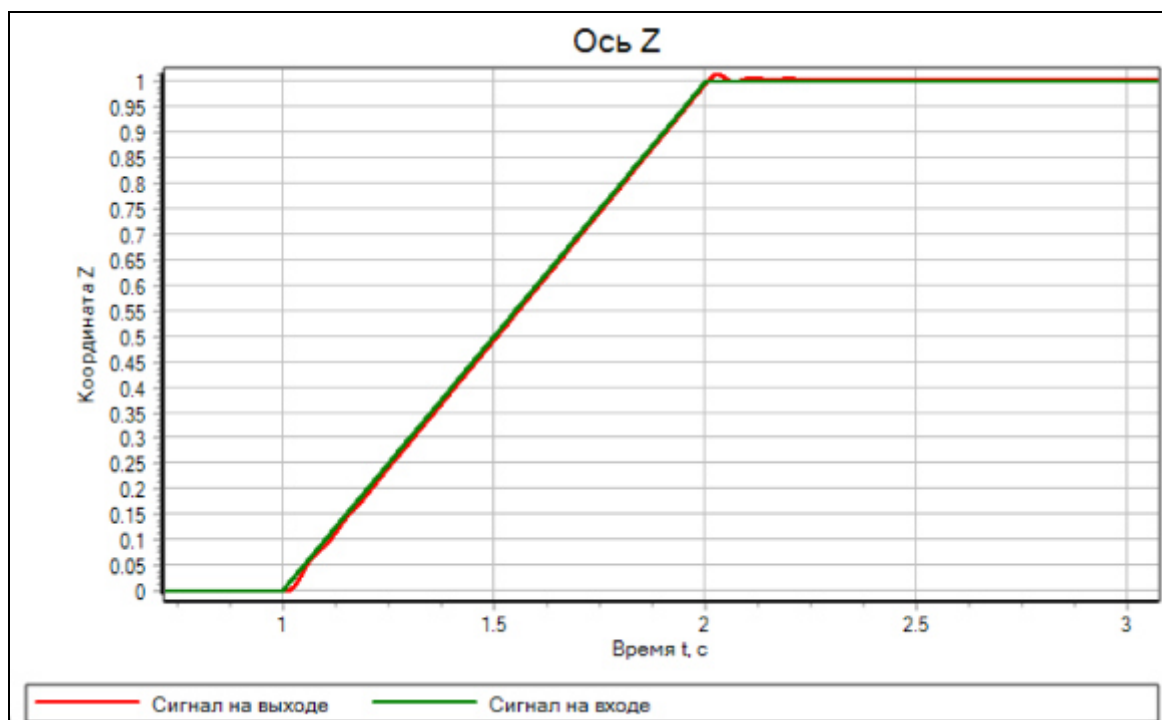


Рис. 5. Кривая регулирования после оптимизации коэффициентов ПИД-регулятора

Оценка прямых показателей качества регулирования

Качество переходного процесса в канале позиционирования оценивается прямыми показателями, измеряемыми по переходной характеристике $x(t)$ при воздействии ступенчатого задания. К основным показателям относят: время переходного процесса (время регулирования) t_p – время, по истечении которого $|x(t) - x_{уст}|$ остается в пределах заданной полосы ($\pm 5\%$); затухание; максимальное перерегулирование σ .

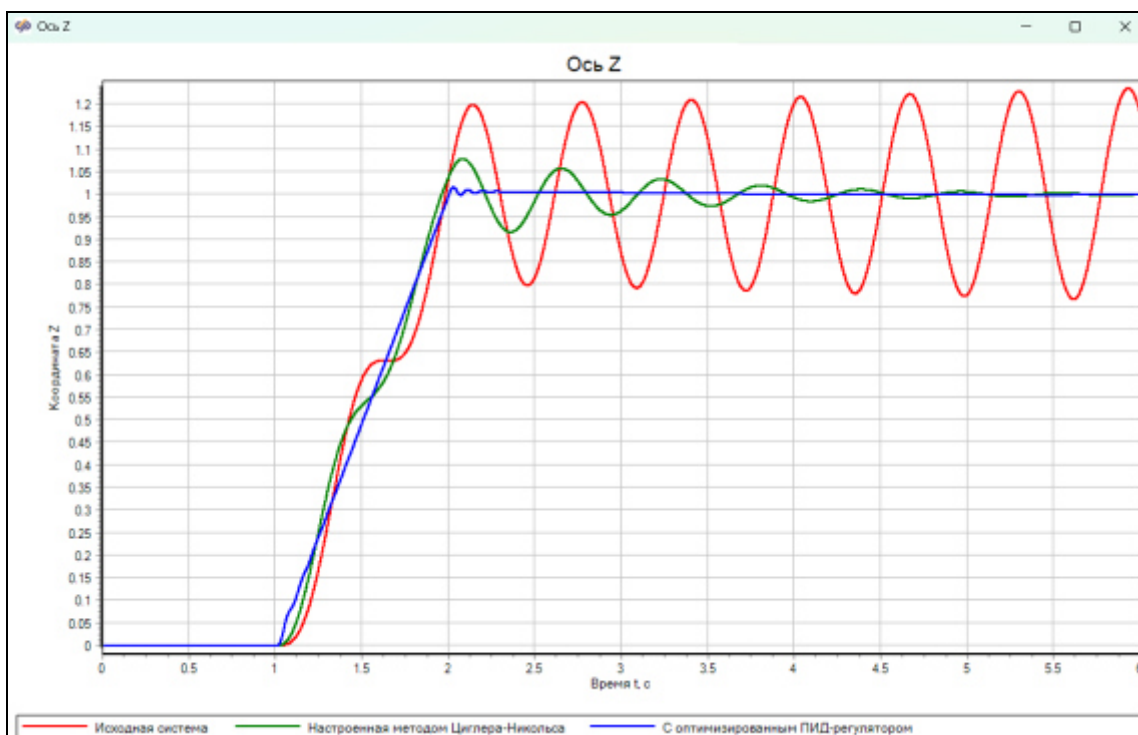


Рис. 6. Сравнение кривых регулирования (Циглер–Никольс и оптимизация)

Таблица 1

Сравнение показателей параметров качества регулирования

Показатель	Схема с ПИД-регулятором настроенным методом Циглера-Никольса	Схема с оптимизированным ПИД-регулятором
t_p, c	2,94	2,033
D (показатель затухания)	0.205	0,333
$\delta, \%$	0.078	0.015

Результаты

Проведенное моделирование подтверждает работоспособность выбранной структуры замкнутого контура для отработки алгоритмов линейного перемещения в SimInTech. Оптимизация коэффициентов ПИД-регуляторов позволяет снизить время переходного процесса при соблюдении ограничений на перерегулирование и уменьшить статическую ошибку в установившемся режиме. При увеличении задержки «Время реакции системы» наблюдается ухудшение запаса устойчивости, что требует более осторожного выбора дифференцирующей составляющей и/или введения фильтра в D-звене. Для повышения сопоставимости результатов между осями целесообразно нормировать критерий оптимизации по диапазону перемещения и использовать одинаковый профиль испытательного воздействия.

Выводы

1. Представленная модель линейного перемещения в SimInTech обеспечивает отработку алгоритмов позиционного управления по осям X, Y, Z с учетом динамики привода, механической инерционности и временной задержки.

2. Использование блока «Оптимизатор» позволяет автоматизировать настройку ПИД-регуляторов по выбранному критерию качества и получить параметры, обеспечивающие требуемое быстродействие при ограничении перерегулирования.

3. Прямые показатели качества (t_p , D , δ) удобны для сравнения вариантов настройки и могут применяться как в составе целевой функции оптимизации, так и для итоговой верификации модели

Библиографические ссылки

1. Карташов Б.А., Козлов О.С., Шабаев Е.А., Щекатуров А.М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М.: ДМК Пресс, 2017. 424 с.

2. Грищенко И.А., Чубарь А.В. Создание математической модели робота с дифференциальным приводом // Материалы II Междунар. науч.-практ. конференции «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего» / ООО «Западно-Сибирский научный центр». Кемерово, 2016. С. 35-37.

3. Мызникова В.А., Устименко В.В., Чубарь А.В. Построение нечётких регуляторов для систем управления автономных объектов в среде SimInTech // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 1. С. 22-27.7. Официальный сайт RoboCup [Электронный ресурс]: режим доступа- <http://www.robocup.org>.

© Чубарь А. В., Загайнов М. С., Юрова Е. Б., 2026

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИКИ НА ВНЕЗАПНОЕ РАСШИРЕНИЕ ПО КОНСТРУКТИВНОЙ БАЗЕ ДАННЫХ ПОДВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ МИКРОТУРБИНЫ

А. А. Кишкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко, Д. В. Васимов, Н. В. Мовчан

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
e-mail: gift_23j@mail.ru

На предложенной базе данных конструктивных размеров экспериментальных подводных устройств спирального и кольцевого типов для центростремительных микро-турбин мощностью до 400 Вт выполнена расчетная оценка коэффициента потерь на внезапное расширение с целью проведения баланса потерь в экспериментальной оценке интегрального коэффициента потерь по перепаду полного давления в подводном устройстве.

Ключевые слова: подводное устройство, центростремительная турбина, коэффициент потерь на внезапное расширение, перепад давлений, двухфазная система терморегулирования.

Оценка энергетики потерь подводного устройства имеет определяющее значение при проектировании центростремительной микро-турбины реализующей органический цикл Ренкина в перспективных двухфазных системах терморегулирования космических аппаратов. Поскольку значение окружной работы на входе в рабочее колесо есть однозначная функция от величины потерь в подводном устройстве.

Для сравнительного анализа интегрального коэффициента потерь в подводном устройстве необходимо предварительно оценить ту часть потерь которая в первом приближении может относиться к потерям на внезапное расширение[1]: поскольку каналный подвод h_0 значительно меньше по площади окружного входа в рабочее колесо на радиусе $R_{1к}$.

Конструктивная схема исследуемого каналного подводного устройства и спирального подводного устройства представлены соответственно на рис. 1. (для кольцевого подводного устройства) и рис.2. (для спирального подводного устройства).

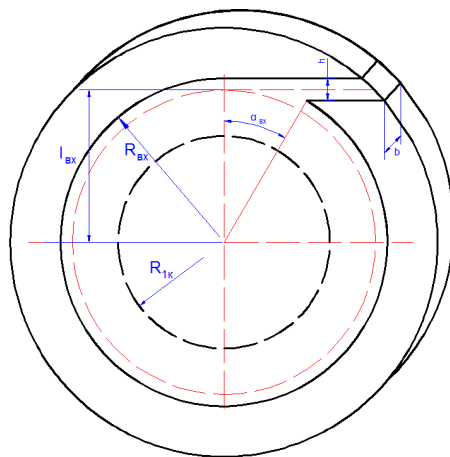


Рис.1. Схема канального кольцевого подводного устройства

Для геометрических параметров, обозначенных на рисунках, используются следующие определения и расчетные соотношения:

- l_{ex} – плечо момента количества движения, где $l_{ex} = R_{ex} - h/2$;

- $d_{экв}$ – диаметр горла эквивалентный, где $d_{экв} = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot h}{\pi}}$;

- ε – степень парциальности, где $\varepsilon = \frac{\alpha_{ex}}{2\pi}$, $\alpha_{ex} = \arccos \frac{R_{ex} - h}{R_{ex}}$;

Re_0 – число Рейнольдса по скорости C_0 , где $Re_0 = \frac{C_0 \cdot d_{экв}}{\nu}$;

Re_ω – число Рейнольдса по окружной скорости, где $Re_\omega = \frac{C_0 l_{ex}}{\nu} = \frac{\omega \cdot l_{ex}^2}{\nu}$;

l_{ex} / R_{1k} – относительное плечо момента количества движения, где $R_{1k} = 24$ мм, – радиус входа в рабочее колесо микротурбины.

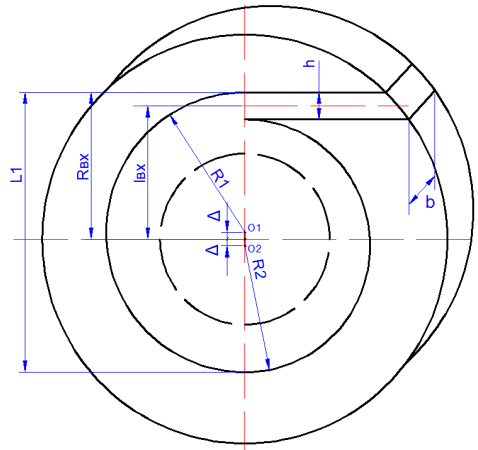


Рис. 2. Схема канального спирального подводящего устройства

Спиральное подводящее устройство формируется совмещением двух радиусов профилирования R_1 и R_2 со смещением центров профилирования на величину Δ (рис. 2).

Обмеряемые параметры спирального подводящего устройства микротурбин [2]:

$b = 3,5$ мм – ширина канала;

D – внешний максимальный диаметр;

δ – расстояние от D до верхней (ближней от D) поверхности канала h ;

L_1 – максимальное расстояние по линии диаметра D ;

h – ширина входного канала.

R_1 – больший радиус профилирования;

R_2 – меньший радиус профилирования;

Δ – смещение центров профилирования;

ε – степень парциальности;

l_{ex} – плечо входного канала по средней линии;

h/R_{1k} – относительная ширина входного канала;

$l_{вх}/R_{1k}$ – относительное плечо входа;

$$d_{экв} = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot h}{\pi}}$$

Выражения для обчета спирального поводящего устройства по результатам обмера:

$$L_1 = R_1 + R_2 + 2\Delta,$$

$$\Delta = 0,5h + \delta + 0,5L_1 \cdot 0,5D,$$

$$R_1 = D - 2\delta - 0,5h - 0,5L_1,$$

$$R_2 = 0,5(L_1 - h),$$

$$l_{\text{BX}} = 0,5D - \delta - 0,5h,$$

$$\alpha_{\text{BX}} = \arccos \frac{l_{\text{BX}} - 0,5h}{l_{\text{BX}} + 0,5h},$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{\text{BX}}}{2\pi}.$$

Выражения для обчета кольцевого поводящего устройства:

$$R_1 = \frac{L_1}{2},$$

$$l_{\text{BX}} = 0,5L_1 - 0,5h;$$

или $l_{\text{BX}} = R_1 - \frac{h}{2}.$

Приняты следующие обозначения для сборников С – спиральный, первая цифра в обозначении: высота h в мм. Вторая цифра в обозначении: l_{BX} плечо момента количества движения в мм (округлено). Например: С6-39 – спиральный $h=6$ мм, $l_{\text{BX}} \approx 39$ мм; К6-32 – кольцевой $h=6$ мм, $l_{\text{BX}} \approx 32$ мм [3, 4].

Согласно обозначениям рис.1 и рис. 2 количественные значения параметров 19 спиральных и 13 кольцевых подводящих устройств представлены в табл. 1. и табл. 2, соответственно, общий вид материальной части тангенциальных подводящих устройств представлены на рис.3.



Рис. 3. Подводящие устройства кольцевого и спирального типа

Диапазон изменения геометрических параметров в безразмерном (относительном) виде (22 конструктивные сборки):

$Re_0=10000\dots 60000=1..6 \cdot 10^4$, – число Рейнольдса по скорости C_0 ;

$l_{\text{BX}}/R_{1k}=0,97\dots 1,62$, – относительное плечо входа;

$h/R_{1k}=0,083\dots 0,25$, – относительная ширина входного канала,

$b = 3,5$ мм – ширина канала;

$R_{1k}=24$ мм, – радиус входа в рабочее колесо микротурбины.

Таблица 1

Конструктивные параметры спиральных подводящих устройств

№ п/п	Обозначение подводящего устройства	D (мм)	h (мм)	δ (мм)	L_1 (мм)	Δ (мм)	R_1 (мм)	R_2 (мм)	$l_{вх}$ (мм)	$d_{гэбв.}$ (мм)	ε	$\alpha_{вх}$ (рад)	$l_{вх}/R_{1к}$	$h/R_{1к}$
1	C6-39	90	6	3,1	80,4	1,3	40,6	37,2	38,9	5,2	0,086	0,542	1,62	0,25
2	C6-36	90	6	6,2	74,4	1,4	37,4	34,2	35,8	5,2	0,089	0,564	1,49	0,25
3	C6-33	90	6	9,1	68,3	1,3	34,7	31,2	32,9	5,2	0,093	0,586	1,37	0,25
4	C6-31	90	6	11,2	64,2	1,3	32,5	29,1	30,8	5,2	0,096	0,605	1,28	0,25
5	C5-39	90	5	4	78,8	0,9	40,1	36,9	38,5	4,7	0,079	0,5	1,604	0,208
6	C5-36	90	5	7	72,8	0,9	37,1	33,9	35,5	4,7	0,082	0,519	1,48	0,208
7	C5-32	90	5	11	65	1	33	30	31,5	4,7	0,087	0,549	1,31	0,208
8	C5-30	90	5	13	60,8	0,9	31,1	27,9	29,5	4,7	0,09	0,567	1,23	0,208
9	C4-38	90	4	5,2	77,4	0,9	38,9	36,7	37,8	4,2	0,071	0,452	1,58	0,167
10	C4-35	90	4	8	71,4	0,7	36,3	33,7	35	4,2	0,074	0,469	1,46	0,167
11	C4-31	90	4	12	63,4	0,7	32,3	29,7	31	4,2	0,079	0,497	1,29	0,167
12	C4-29	90	4	14	59,2	0,6	30,4	27,6	29	4,2	0,081	0,514	1,23	0,167
13	C3-37	90	3	6	76	0,6	38,4	36,4	37,4	3,8	0,064	0,408	1,56	0,13
14	C3-34	90	3	9	70	0,6	35,4	33,4	34,4	3,8	0,067	0,425	1,43	0,13
15	C3-30	90	3	13,4	61,8	0,9	30,7	29,3	30	3,8	0,072	0,454	1,25	0,13
16	C3-28	90	3	15	58	0,6	29,4	27,4	28,4	3,8	0,074	0,467	1,18	0,13
17	C2-37	90	2	7,2	74,4	0,5	37,3	36,1	36,7	3,1	0,054	0,343	1,53	0,092
18	C2-34	90	2	10	68,4	0,3	34,7	33,1	33,9	3,1	0,056	0,356	1,41	0,092
19	C2-28	90	2	16	56,6	0,3	28,7	27,3	28	3	0,062	0,391	1,16	0,083

Таблица 2

Конструктивные параметры кольцевых подводящих устройств

№ п/п	Обозначение подводящего устройства	D (мм)	h (мм)	δ (мм)	L_1 (мм)	Δ (мм)	R_1 (мм)	R_2 (мм)	$l_{вх}$ (мм)	$d_{гэбв.}$ (мм)	ε	$\alpha_{вх}$ (рад)	$l_{вх}/R_{1к}$	$h/R_{1к}$
1	K6-32	90	6	-	70	-	35	-	32	5,2	0,094	0,594	1,33	0,25
2	K6-24	90	6	-	53	-	26,5	-	23,5	5,2	1,109	0,686	0,97	0,25
3	K5-26	90	5	-	56	-	28	-	25,5	4,7	0,087	0,551	1,06	0,208
4	K5-24	90	5	-	52	-	26	-	23,5	4,7	0,1	0,631	0,97	0,208
5	K4-33	90	4,2	-	70	-	35	-	32,9	4,3	0,078	0,495	1,37	0,175
6	K4-32	90	4	-	64	-	32	-	30	4,2	0,08	0,505	1,25	0,167
7	K4-26	90	4	-	56	-	28	-	26	4,2	0,086	0,541	1,08	0,167
8	K3-33	90	3,2	-	70	-	35	-	33,4	3,8	0,68	0,431	1,39	0,13
9	K3-27	90	3	-	56	-	28	-	26,5	3,7	0,074	0,467	1,1	0,125
10	K3-25	90	3	-	52	-	26	-	24,5	3,7	0,077	0,485	1,02	0,125
11	K2-34	90	2,2	-	70	-	35	-	33,9	3,1	0,067	0,423	1,41	0,092
12	K2-27	90	2	-	56	-	28	-	27	3	0,06	0,38	1,12	0,083
13	K2-25	90	2	-	52	-	26	-	25	3	0,062	0,395	1,04	0,083

В качестве влияющих параметров на энергетику выбраны два конструктивных и один режимный параметр, позволяющий сформировать базу данных по коэффициенту потерь от трех переменных.

Предлагается оценить классический коэффициент потерь (потери Карно-Борда) на внезапное расширение, для случаев двух характерных радиусов R_0 и $R_{1к}$, где

$$R_0 = l_{ex} + h / 2. \quad (1)$$

Предлагается геометрический расчет испытываемых устройств по следующему алгоритму:

Площадь входного канала до внезапного расширения:

$$F_0 = h_0 \cdot b_0, \quad (2)$$

где: h_0 – высота канала; b_0 – ширина.

Площадь радиально-кольцевого сечения на радиусе рабочего колеса R_{1k} :

$$F_{1k} = 2\pi R_{1k} b_0, \quad (3)$$

где R_{1k} – радиус входа в рабочее колесо.

Площадь радиально-кольцевого сечения на радиусе входа входного канала R_0 :

$$F_1 = 2\pi R_0 \cdot b, \quad (4)$$

Коэффициент внезапного расширения на радиусе R_{1k} :

$$n_{1k} = \frac{F_{1k}}{F_0}. \quad (5)$$

Коэффициент потерь на внезапное расширение на радиусе R_{1k} :

$$\zeta_{1k} = \left(1 - \frac{F_0}{F_{1k}}\right)^2 = \left(1 - \frac{1}{n_{1k}}\right)^2. \quad (6)$$

Коэффициент внезапного расширения на радиусе R_0 :

$$n_1 = \frac{F_1}{F_0}. \quad (7)$$

Коэффициент потерь на внезапное расширение на радиусе R_0 :

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 = \left(1 - \frac{1}{n_1}\right)^2. \quad (8)$$

Результаты расчета коэффициентов потерь на внезапное расширение для спиральных и кольцевых сборников представлены в табл. 3; табл. 4.

Таблица 3

Результаты расчета коэффициента потерь на внезапное расширение для спиральных сборников (Продолжение таблицы 1)

№ п/п	Обозначение	R_0 (мм)	F_1 (мм ²)	F_0 (мм ²)	F_{1k} (мм ²)	n_{1k}	ζ_{1k}	n_1	ζ_1
1	C6-39	41,9	921	21	527,52	25,12	0,923	43,85	0,956
2	C6-36	38,8	852,8	21	527,52	25,12	0,923	60,6	0,967
3	C6-33	35,9	789	21	527,52	25,12	0,923	37,57	0,947
4	C6-31	33,8	743	21	527,52	25,12	0,923	35,38	0,944
5	C5-39	41	901	17,5	527,52	30,144	0,934	51,48	0,961

6	C5-36	38	835	17,5	527,52	30,144	0,934	47,71	0,958
7	C5-32	34	747	17,5	527,52	30,144	0,934	42,68	0,953
8	C5-30	32	703	17,5	527,52	30,144	0,934	40,17	0,95
9	C4-38	39,8	875	14	527,52	37,68	0,948	62,5	0,968
10	C4-35	37	813	14	527,52	37,68	0,948	58	0,965
11	C4-31	33	725	14	527,52	37,68	0,948	51,78	0,961
12	C4-29	31	681	14	527,52	37,68	0,948	48,64	0,959
13	C3-37	39	857	11,2	527,52	47,1	0,958	76,51	0,974
14	C3-34	36	791	11,2	527,52	47,1	0,958	70,62	0,971
15	C3-30	31,6	695	11,2	527,52	47,1	0,958	62,05	0,968
16	C3-28	30	659	11,2	527,52	47,1	0,958	58,83	0,966
17	C2-37	37,8	831	7,7	527,52	68,5	0,97103	107,92	0,981
18	C2-34	35	769	7,7	527,52	68,5	0,97103	99,87	0,98
19	C2-28	29,1	640	7	527,52	75,36	0,9763	91,42	0,978

Таблица 4

Результаты расчета коэффициента потерь на внезапное расширение для кольцевых сборников (Продолжение таблицы 2)

№ п/п	Обозначение	R_0 (мм)	F_1 (мм ²)	F_0 (мм ²)	F_{1k} (мм ²)	n_{1k}	ζ_{1k}	n_1	ζ_1
1	K6-32	35	769,3	21	527,52	25,12	0,921	36,63	0,946
2	K6-24	26,5	582,5	21	527,52	25,12	0,921	27,73	0,929
3	K5-26	28	615,4	17,5	527,52	30,144	0,934	35,168	0,943
4	K5-24	26	571,5	17,5	527,52	30,144	0,934	32,65	0,939
5	K4-33	35	769,3	14,7	527,52	35,8	0,944	52,33	0,962
6	K4-32	32	703,4	14	527,52	37,68	0,948	50,24	0,96
7	K4-26	28	615,4	14	527,52	37,68	0,948	43,95	0,955
8	K3-33	35	769,3	11,2	527,52	47,1	0,958	68,68	0,971
9	K3-27	28	615,4	10,5	527,52	50,24	0,96	43,95	0,955
10	K3-25	26	571,5	10,5	527,52	50,24	0,96	54,42	0,963
11	K2-34	35	769,3	7,7	527,52	68,5	0,971	99,9	0,98
12	K2-27	28	615,4	7	527,52	75,36	0,9763	87,91	0,977
13	K2-25	26	571,5	7	527,52	75,36	0,9763	81,64	0,975

Предварительный анализ расчетов коэффициентов потерь на внезапное расширение показывает, что изменение коэффициента потерь в диапазоне изменения конструктивных параметров подводных устройств микротурбины происходит в диапазоне 0,95...0,98 для обоих случаев конструкции. Значение полученных коэффициентов необходимо для энергетического анализа экспериментальной базы данных по коэффициентам потерь общего вида полученного по разнице полных давлений между канальным подводным устройством и диаметром входа D_{1k} с целью выделения и анализа физических основ сопутствующих потерь в проточной части подводного устройства. Стоит предположить, что потери на внезапное расширения значительны в общем балансе потерь в подводном устройстве микротурбины [5].

Библиографические ссылки

1. О.В. Шилкин, Ю. Н. Шевченко, А. В. Делков, А. А. Кишкин, П. А. Снетков, М. У. Абдуллаев / РАДИАЛЬНО-ОКРУЖНОЙ ПОТОК В МИКРОТУРБИНЕ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 1. С. 124-133.

2. Ю. Н. Шевченко, А. В. Делков, А. А. Кишкин / ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ПОДВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ МИКРОТУРБИНЫ // В сборнике: Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика. Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2025. С. 95-101.

3. Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, А. А. Кишкин, А. В. Делков, М. У. Абдуллаев / Обзор существующих вариантов двухфазных систем терморегулирования космических аппаратов // Материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (08–10 ноября 2023, г. Красноярск): в 2 ч. подбщ. ред. Ю. Ю. Логинова. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2023. – Ч. 1. С. 248-251.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ: монография / Шилкин О.В., Кишкин А.А., Делков А.В., Зувев А.А., Лавров Н.А., под ред. д.т.н., проф. А.А. Кишкина.

5. О. В. Шилкин, Ю. Н. Шевченко, А. В. Делков, А. А. Кишкин, М. У. Абдуллаев / ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ // В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. В 2-х частях. Красноярск, 2024. С. 242-244.

© Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н.,
Васимов Д. В., Мовчан Н. В., 2026

учтено при разработке специализированных установок для выращивания медных волноводов.

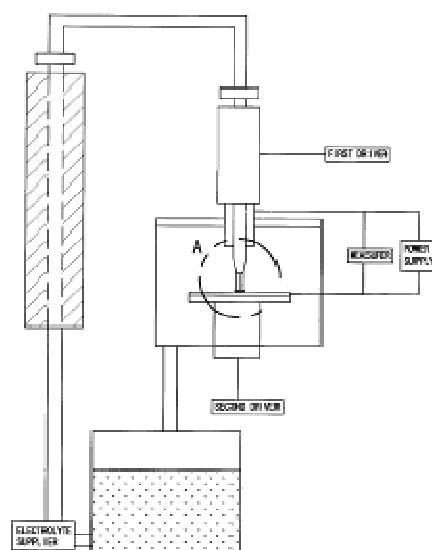


Рис. 1. Устройство 3D печати с использованием селективного электрохимического осаждения [1]

Проектирование установки для гальванопластического формообразования деталей сложной формы из медных сплавов ориентировано на создание универсальной и сравнительно недорогой платформы для реализации комбинированного аддитивно-электрохимического процесса. В ходе проектирования были проанализированы конструктивные решения распространённых FDM 3D-принтеров, выполнен обоснованный выбор материалов, механических узлов и электронной базы, а также разработана трёхмерная модель установки с учётом требований к точности позиционирования, жёсткости конструкции и устойчивости к воздействию электролита.

При разработке кинематики и системы управления использовались открытые разработки сообществ «OpenBuilds» и «RepRap» [3, 4], что позволило опереться на проверенные инженерные решения. В качестве базовой была выбрана декартова кинематика, при которой печатающая головка перемещается по осям X и Z , а рабочий стол – по оси Y . Такая схема не предназначена для работы на высоких скоростях свыше 80–100 мм/с, однако для гальванопластического формообразования это не является ограничением, поскольку процесс осаждения меди требует существенно меньших скоростей перемещения, находящихся в диапазоне 10–20 мм/с.

Рама и направляющие выполнены на основе алюминиевого профиля типа «V-slot» с применением дерлиновых роликов, центрирующихся в пазах профиля. Регулировка прижима роликов осуществляется эксцентриками, что позволяет снизить люфты и повысить точность перемещений. Перемещение по оси Z реализовано с помощью трапецидального однозаходного винта с латунной ходовой гайкой, обеспечивающего плавный и стабильный ход. Для осей X и Y применены зубчатые ремни типа 2GT с соответствующими роликами.

В качестве приводов используются шаговые двигатели Nema 17 с углом шага $0,9^\circ$. С учётом дробления шага на 16 микрошагов и выбранного шага ходового винта, равного 1 мм за оборот, обеспечивается возможность достижения теоретической точности перемещения по оси Z порядка 1 микрона, что является критически важным для послойного электроосаждения меди. Позиционирование по всем координатным осям осуществляется с применением механических конечных выключателей.

Система управления построена на базе Arduino Mega с восьмибитным микроконтроллером Atmel ATmega2560 и платы расширения RAMPS 1.4, оснащённой драйверами шаговых двигателей A4988 и графическим дисплеем LCD12864. Такое решение позволяет использовать стандартные программные средства для 3D-принтеров с минимальной адаптацией под задачи гальванопластического формообразования. Питание установки осуществляется от импульсного блока питания MeanWell с выходным напряжением 12 В и мощностью 200 Вт, обеспечивающего стабильную работу всех узлов в ходе экспериментальных исследований.

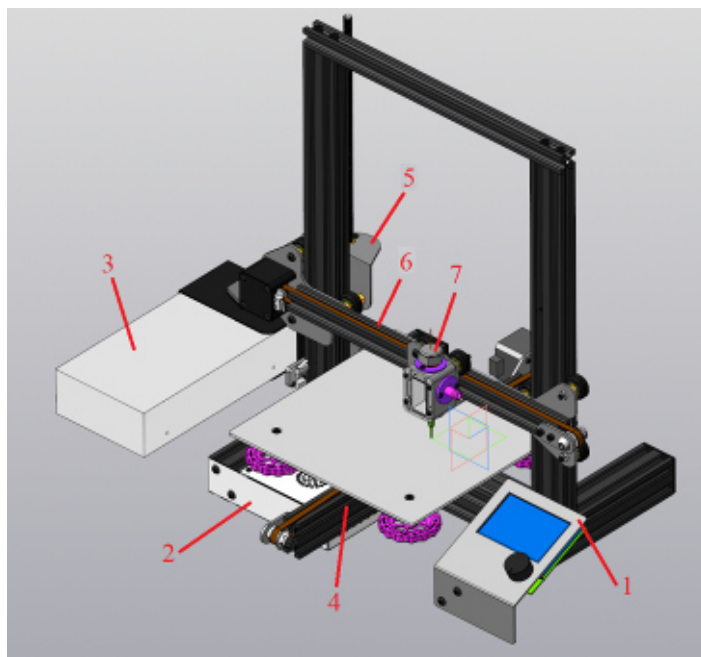


Рис. 2. 3D-модель спроектированной установки

3D модель спроектированной установки (рис. 2) состоит из дисплея с энкодером для управления 1, блока электроники 2, блока питания 3, оси Y 4 с установленной на ней печатной платформе, оси Z 5 с соединенной осью X 6, по которой перемещается инструмент 7. Такая структура позволяет осуществлять интерполяцию движения инструмента по трем осям в зависимости от режимов гальванического формообразования.

Выводы. Спроектированная установка станет первым прототипом для гальванопластического формообразования деталей сложной формы из медных сплавов с требуемой точностью и производительностью.

Библиографические ссылки

1. Patent US 2018178461 A1. 3D PRINTING APPARATUS USING SELECTIVE ELECTROCHEMICAL DEPOSITION. KIM SUNGBIN, YOO BONGYOUNG.
2. Patent KR 102015009969 1A. 3D PRINTING APPARATUS AND 3D PRINTING METHOD USING ELECTROPLATING METHOD/
3. OpenBuilds [Электронный ресурс]. URL: <https://builds.openbuilds.com> (дата обращения: 13.01.2026).
4. RepRap [Электронный ресурс]. – URL: <https://reprap.org> (дата обращения: 12.01.2026).

© Причина А. С., Левко В. А. 2026

КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ

И. В. Трифанов, К. А. Гордеева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sibgau-uks@mail.ru

Рассмотрены термодатный и дистанционный метод контроля температуры в зоне резания винтовой поверхности глобоидного червяка. Предложена дистанционная методика оценки температуры в зоне резания и повышения стойкости режущих элементов многолезвийного инструмента.

Ключевые слова: винтовая поверхность, глобоидный червяк, многолезвийный инструмент, ротационное точение.

Изготовление профильно-сопряженных глобоидно-цилиндрических червячных передач с увеличенным радиусом приведенной кривизны позволяет повысить нагрузочную способность в 2-2,5 раза по сравнению с глобоидными передачами с линейчатый червяком. Однако такие технологии требуют разработки новых методов резания винтовых поверхностей [1,2] и контроля параметров.

Для изготовления винтовой поверхности глобоидного червяка вогнутого радиусного профиля применяется ротационное точение принудительно вращаемым многолезвийным инструментом, режущие элементы которого выполнены по выпуклой эвольвенте из быстрорежущей стали Р6М5. Нарезание винтовой поверхности глобоидного червяка из стали 40ХН, очерченной по вогнутой эвольвенте производилась на зубофрезерном станке. Процесс резания при ротационном точении сопровождается трением качения с трением скольжения режущих элементов многолезвийного инструмента с обрабатываемой поверхностью детали.

В зоне резания выделяется тепловая энергия, которая распределяется в поверхность обрабатываемой детали, в режущие элементы многолезвийного инструмента, в стружку и окружающую среду [3].

Доля теплоты Q_c переходящей в стружку может быть оценена выражением:

$$Q_c = f(V, S, \lambda, \kappa, P, \sin \varphi) \quad (1)$$

где V - скорость резания, м/мин; S - радиальная подача, мм/об.; φ - угол сдвига ($\varphi = 25^\circ - 35^\circ$); λ - температура проводимости обрабатываемого материала (мм²/с); κ - коэффициент усадки стружки; P - коэффициент, зависящий от условий механической обработки детали.

Так же Q_c можно рассчитать по формуле:

$$Q_c = c \cdot m(T_c - T_{амм}) \quad (2)$$

где c - теплоемкость материала стружки; m - масса стружки; T_c - температура стружки; $T_{амм}$ - температура окружающей среды.

При ротационном точении может применяться термодатный метод для контроля температуры.

Специфика термопарного метода для ротационного точения имеет свои особенности.

Ротационное точение предъявляет особые требования к термопарным измерениям: вращение инструмента требует надежного съема сигнала, а массивный инструмент создает значительный отвод тепла от зоны резания. Термопарный метод в данном случае дополняет тепловизионный контроль, обеспечивая калибровку бесконтактных измерений и регистрацию температуры в труднодоступных зонах (например, на задней поверхности инструмента) [4].

Промышленные модели термопар для ротационного точения основаны на термоэлектрическом преобразователе.

Термоэлектрический преобразователь ТП-2488 производства России специально разработан для контроля температур в процессах механической обработки и переработки материалов.

Диапазон измерений: $-40...+400^{\circ}\text{C}$. Для измерения могут применяться термопары ХА – хромель-алюминиевая термопара или ХК – хромель-копелевая термопара.

Исполнение ТП-2488В – вибропрочное, что важно для процесса резания, для ротационного точения обладает также виброустойчивостью.

Преобразователь ТП-2488НЗ может быть выполнен нестандартным путем изготовления по эскизам заказчика для встраивания во вращающийся инструмент.

Могут применяться тонкопленочные термопары для решения специализированных задач.

Для минимального влияния на процесс резания и максимального быстрогодействия применяются тонкопленочные термопары, напыляемые непосредственно на режущую пластину.

Широко применяются материалы хромель-алюмель (тип К), медь-константан (тип Т), которые характеризуются постоянной времени $< 0,01$ с., а также погрешностью $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ (при индивидуальной градуировке).

Особенностью является то, что при работе требует защитного диэлектрического покрытия.

Важную роль играет конструкция с плоскими термоэлектродами толщиной в несколько микрометров, размещенными между двумя половинами составного образца, что позволяет создавать спай, перемещающийся по мере срезания материала. Такой подход обеспечивает постоянство площади контакта и высокую точность измерений.

Для контроля температуры в зоне резания при ротационном точении в диапазоне $-80...+400^{\circ}\text{C}$ оптимальными являются:

- промышленная термопара ТП-2488 (тип К, класс 1, вибропрочное исполнение) предназначенная для серийных измерений, внесена в Госреестр СИ РФ;
- метод естественной термопары (инструмент-деталь) – для калибровки тепловизора и исследования влияния режимов резания;
- тонкопленочные термопары для прецизионных исследований

Основным фактором точности является качество съема сигнала с вращающегося инструмента (сферический или катушечный токосъемник) и индивидуальная тарировка для конкретной пары материалов [5].

Недостатком термопарного метода является сложность его реализации при ротационном точении многолезвийным инструментом.

Для измерения температуры может применяться FLUKE 568, представляющий собой пирометр (инфракрасный термометр), который сочетает бесконтактное инфракрасное и контактное измерение температуры поверхности. Производитель – Fluke Corporation (США). Пирометр может использоваться для измерения температуры механического и электрического оборудования, расплавленных материалов (стекло, полимеры, легкоплавкие металлы). Также прибор применяют в условиях производства, где ведутся сва-

рочные или порезочные работы, строительными бригадами для поиска мест утечки тепла, для контроля температуры в пищевой и иных отраслях промышленности [6].

Для измерения температуры при ротационном точении также может применяться модель инфракрасного тепловизора BALTECH TR-01500, которая выполнена в виде переносного оптико-электронного измерительного микропроцессорного прибора. Тепловизор предназначен для бесконтактных измерений пространственного распределения радиационной температуры объектов по их собственному тепловому излучению и визуализации этого распределения на дисплее тепловизора.

Принцип действия основывается на том, что тепловое излучение от исследуемого объекта, передаваемое через оптическую систему на приёмник, преобразуется в цифровой сигнал и отображается в виде термограммы на высококонтрастном жидкокристаллическом дисплее тепловизора.

Тепловизор позволяет получить термо-граммы по которым можно выявить распределение температур в заданной области, а также определить в зоне наблюдения самый нагретый участок и измерить его температуру с требуемой точностью. Например, погрешность измерения может не превышать ± 2 °C [7].

Применение тепловизора не накладывает ограничений на конструкцию режущего инструмента, приспособлений и станка.

Технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики BALTECH TR-01500

Диапазон измерений	Спектральный диапазон	Погрешность измерения
-20...+500 °C	8...14 мкм	± 2 °C

Известно, что температура резания может оказывать существенное влияние на стойкость режущих элементов многолезвийного инструмента, точность и качество обрабатываемой поверхности. Контроль температуры в зоне резания возможен путем применения термопар, однако схема измерения при этом достаточно сложная и трудно реализуемая. В связи с отмеченными недостатками применялся дистанционный контроль температуры инфракрасным термометром FLUKE 568 с диапазоном измерения от -40 °C до 800 °C, пределом допустимой погрешности ± 1 °C. На поверхности стружки температура была в пределах $152,2...274,5$ °C, на режущем лезвии многолезвийного инструмента на входе в зону резания $40,6...64,5$ °C, на выходе из зоны резания $45,2...70,3$ °C.

Ранее было установлено, что 70-75% тепла переходит в стружку, что позволяет оценить изменение температуры непосредственно в зоне резания в пределах $217...392$ °C. Известно, что стойкость быстрорежущей стали снижается при температуре резания $500-600$ °C.

На основании выполненных измерений следует, что твердость режущих элементов многолезвийного инструмента в процессе ротационного точения снижается незначительно на 3-4 HRC. Это позволяет сделать вывод, что прерывистый процесс резания при ротационном точении многолезвийным инструментом способствует повышению стойкости режущих элементов по сравнению с технологией обработки трехрезцовою головкой по существующей технологии винтовых поверхностей.

Прерывистый процесс резания при ротационном точении сопровождается образованием элементной стружки, что позволяет повысить безопасность обработки и более точно определить температуру стружки бесконтактным методом при помощи инфракрасного термометра FLUKE 568.

Выводы: Показан термопарный метод контроля температуры при ротационном точении винтовой поверхности детали, а также его недостатки при ротационном нарезании

винтовой поверхности глобоидного червяка. Представлены приборы и дистанционные методы определения температуры в зоне резания при ротационном точении винтовой поверхности глобоидного червяка очерченной по вогнутой эвольвенте.

На основании выполненных измерений температуры бесконтактным методом установлена возможность повышения стойкости режущих элементов в несколько раз по сравнению с существующей технологией обработки винтовой поверхности трехрезцовой головкой.

Библиографические ссылки

1. Сандлер, А. И. Производство червячных передач / А. И. Сандлер, С. А. Лагутин, А. В. Верховский ; под общ. ред. С. А. Лагутина. – Москва : Машиностроение, 2008. – 271 с.

2. Кривенко И.С. Внедрять в производство новые разработки // Редукторы и приводы. 2007. №1. С.34-35.

3. Трифанов И.В. Технология нарезания глобоидных и цилиндрических винтовых поверхностей вогнутого профиля деталей машин: монография / И.В. Трифанов, Л.С. Малько, А.В. Сутягин; СибГУ им. М.Ф. Решетнева – Красноярск. 2017. – 110 с.

4. Патент RU 2625626 С1, Российская Федерация. Устройство для измерения термоэлектродвижущей силы резания при точении / Некрасов Ю.И., Некрасов Р.Ю., Стариков А.И., Фомин А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Тюменский индустриальный университет". – № 2016106369; заявл. 24.02.2016; опубл. 17.07.2017, Бюл. № 20. – 9 с.

5. Патент RU 2574234 С1, Российская Федерация. Устройство для измерения температуры в зоне резания при точении / Козлова М.А., Серебренникова А.Г. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Юго-Западный государственный университет". – № 2014145654/28; заявл. 13.11.2014; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. – 7 с.

6. Обработка металлов 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://journals.nstu.ru/files/numbers/flash/4161/47/> (дата обращения: 14.02.2026).

7. Измерение температуры в зоне резания при точении с помощью тепловизионного метода [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-temperatury-v-zone-rezaniya-pri-tochenii-s-pomoschu-teplovizionnogo-metoda> (дата обращения: 16.02.2026).

© Трифанов И. В., Гордеева К. А., 2026

ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ПРИСУТСТВИИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Г.С. Баглай, А.К. Данилов, Н.А. Шепета

Сибирский федеральный университет
Красноярск, Россия

В статье рассматривается разработка специализированного прибора для мониторинга состояния рабочих поверхностей технологических реакторных агрегатов в условиях термодинамического воздействия и присутствия агрессивных сред. Описываются существующие методы контроля, теоретическая основа создания прибора, его конструкция и ключевые показатели получаемой информации. Предложенный подход позволяет повысить надёжность эксплуатации реакторного оборудования и своевременно выявлять критические изменения состояния рабочих поверхностей.

Основная часть

Эксплуатация технологических реакторных агрегатов сопряжена с воздействием экстремальных факторов: высоких температур, давления, коррозионно-активных сред, радиационного излучения. Эти факторы приводят к деградации рабочих поверхностей, что может вызвать аварийные ситуации. Актуальность разработки специализированного прибора обусловлена необходимостью непрерывного мониторинга состояния поверхностей в реальном времени для предотвращения отказов оборудования.

Ключевые проблемы эксплуатации реакторных агрегатов:

- Коррозия и эрозия поверхностей под действием агрессивных сред (кислот, щелочей, расплавов солей).
- Термическая усталость из-за циклических изменений температуры, приводящих к образованию микротрещин.
- Радиационное повреждение материалов, изменяющее их физико-химические свойства.
- Отложения (шламы, оксиды), ухудшающие теплообмен и вызывающие локальные перегревы.
- Механические напряжения из-за неравномерного теплового расширения компонентов.

Традиционные методы контроля (визуальный осмотр, ультразвуковая дефектоскопия) не всегда применимы в условиях эксплуатации реакторов из-за недоступности зон контроля и необходимости остановки оборудования.

Работа реакторов химической промышленности связана с использованием химических процессов с агрессивными режимами работы. Высокая температура, химическая агрессивность процессов переработки и устройства реакторов создают возможность образования на стенках реактора осадения, препятствующих активности процессов, снижая эффективность и производительность работы реакторов.

Прогноз и оценка износа реакторных ёмкостей величина осадения химических отложений требует остановки процессов и снижение режимов реакции, или полной остановки и удаления химических реагентов из реактора.

Предотвратить критические ситуации с реакторами, предвидеть и прогнозировать технологическую остановку для удаления и ремонта ёмкостей направлено несколько технологий диагностики и прогноза.

Так одним из путей диагностики является расчётный путь износа поверхностей и увеличения отложений на поверхности реакторов. При этом время технологической остановки определено теоретически и в большинстве случаев не совпадает с состоянием рабочих ёмкостей реакторов и величины осаждения продуктов реакции. Не точное определение параметров осадений приводит к снижению эффективности химического процесса необоснованного увеличения энергоёмкости и снижения качества получаемого продукта.

Основной целью исследований ударно-волновых явлений в твердых телах является обеспечение прогнозируемости действия взрыва, высокоскоростного удара, лазерных и других интенсивных импульсных воздействий на материалы и конструкции. В современном понимании исчерпывающая прогнозируемость достигается компьютерным моделированием рассматриваемых процессов, для чего нужны термодинамические уравнения состояния, описывающие связь между давлением, плотностью, фазовым составом и внутренней энергией вещества, а также определяющие соотношения, описывающие процессы химических, фазовых и полиморфных превращений, упругопластические деформации и разрушение в терминах, совместимых с уравнениями сохранения и уравнением состояния.

В ближайшее десятилетие следует ожидать значительного расширения применения техники ударных волн для решения задач физики твердого тела, материаловедения, физики прочности и пластичности.

Реакторы применяются для проведения разнообразных процессов: полимеризации, конденсации, синтеза органических и неорганических соединений, гидрирования, окисления, нитрования. Объем промышленных аппаратов варьируется от нескольких литров в лабораторных установках до 100 кубометров на крупных производствах.

В непрерывном реакторе все стадии процесса происходят одновременно, но в разных зонах аппарата. Исходное сырье непрерывно подается в реактор, проходит через реакционную зону и в виде готового продукта выводится из системы. Такая организация процесса обеспечивает стабильные рабочие параметры и высокую производительность.

Непрерывные реакторы используются в крупнотоннажных производствах базовых химических продуктов: аммиака, метанола, серной кислоты, полимеров. Производительность таких установок может достигать тысяч тонн продукта в сутки.

Колонный реактор имеет вытянутую вертикальную конфигурацию с отношением высоты к диаметру более 5. Внутри колонны размещаются контактные устройства для взаимодействия газовой и жидкой фаз: тарелки различных типов, насадочные элементы, распределительные устройства.

Колонные аппараты широко используются в процессах каталитического синтеза, абсорбции, ректификации, экстракции. Высота промышленных колонн может достигать 40 метров при диаметре до 6 метров.

Нержавеющая сталь является основным конструкционным материалом для химических реакторов благодаря высокой коррозионной стойкости и механической прочности. Наиболее распространены марки AISI 304, AISI 316 и AISI 321, обеспечивающие работу при температурах до 350 градусов и давлении до 10 МПа согласно ГОСТ 20680-2002.

Марка AISI 316 с добавлением молибдена обладает повышенной стойкостью к хлоридам и применяется в агрессивных средах. Для особо жестких условий используют специальные сплавы на основе никеля Hastelloy, выдерживающие работу с концентрированными кислотами при повышенных температурах.

Существующие методы диагностики реакторного оборудования:

1. Ультразвуковая дефектоскопия – выявляет трещины и расслоения, но требует подготовки поверхности и не всегда эффективна при высоких температурах.
2. Вихрековый контроль – обнаруживает поверхностные дефекты, но ограничен в применении для ферромагнитных материалов.

3. Рентгенография и гамма-дефектоскопия – дают детализированную картину дефектов, но опасны из-за радиационного фона.

4. Электропотенциальный метод – основан на измерении распределения электрического потенциала, чувствителен к трещинам.

5. Оптические методы (эндоскопия, лазерная профилометрия) – позволяют визуализировать поверхность, но требуют прямого доступа.

6. Тепловизионный контроль – фиксирует температурные аномалии, косвенно указывающие на дефекты.

Недостатки: большинство методов требуют остановки работы агрегата, не обеспечивают непрерывный мониторинг и не адаптированы к агрессивным средам.

Теоретическая основа создания прибора. Прибор базируется на комбинации сканирующей контактной потенциометрии и термического анализа:

Сканирующая контактная потенциометрия:

Измеряет локальные изменения электрического потенциала на поверхности.

Позволяет выявить области с повышенной коррозией или трещинами по аномалиям потенциала.

Математическая модель: распределение потенциала $\varphi(x, y)$ связано с удельным сопротивлением ρ и толщиной оксидного слоя d :

$$\varphi(x, y) \sim \frac{I \cdot \rho}{d}$$

где I – ток, протекающий через контакт.

Термисторный анализ:

Использует термисторы для измерения локальных температур и тепловых потоков.

Фиксирует аномалии теплопередачи, вызванные отложениями или трещинами.

Уравнение теплового баланса:

$$q = -k\nabla T$$

где q – тепловой поток, k – теплопроводность материала, T – температура.

Коррозионный мониторинг:

Электрохимические датчики измеряют скорость коррозии через ток коррозии i_{corr} .

Связь с потерей массы материала:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{i_{\text{corr}} \cdot M}{n \cdot F}$$

где M – молярная масса, n – валентность, F – постоянная Фарадея.

Формирование прибора и основные показатели получения информации. Конструкция прибора:

Сенсорный модуль:

- Потенциометрические электроды для измерения потенциала.
- Термисторы для температурного мониторинга.
- Электрохимические датчики коррозии.

Защитный корпус из коррозионностойкого сплава (например, хастеллой) с термоизоляцией.

Система охлаждения на основе циркулирующего теплоносителя для защиты электроники.

Блок обработки данных:

- АЦП для преобразования аналоговых сигналов.
- Микроконтроллер для расчёта показателей.
- Модуль беспроводной передачи данных (Wi-Fi/LoRaWAN).

Программное обеспечение:

- Алгоритмы обработки сигналов (фильтрация шумов, Фурье-анализ).

- База данных для хранения истории измерений.
- Визуализация результатов (графики, тепловые карты).

Основные показатели, получаемые прибором:

1. Распределение электрического потенциала (φ , В) – выявляет области коррозии и трещин.

2. Локальная температура (Т, С) и тепловой поток (q , Вт/м²) – фиксирует нарушения теплообмена.

3. Скорость коррозии (i_{corr} , мкА/см²) – количественная оценка деградации материала.

4. Толщина оксидного слоя (d , мкм) – рассчитывается на основе потенциала и сопротивления.

5. Механические напряжения (σ , МПа) – определяются по изменению электрического сопротивления.

6. Профиль поверхности (шероховатость, мкм) – сканируется лазерным профилометром (опционально).

Преимущества прибора:

- Непрерывный мониторинг в режиме реального времени.
- Работа в агрессивных средах и при температурах до 700 С.
- Минимальное вмешательство в работу реактора.
- Автоматическая сигнализация при достижении критических значений.

Разработанный прибор позволяет комплексно оценивать состояние рабочих поверхностей реакторных агрегатов, объединяя электрофизические, тепловые и коррозионные измерения. Внедрение такого устройства повысит надёжность эксплуатации оборудования, сократит затраты на внеплановые ремонты и предотвратит аварийные ситуации. Дальнейшие исследования могут быть направлены на миниатюризацию сенсора и интеграцию с системами искусственного интеллекта для прогнозирования остаточного ресурса.

Библиографические ссылки

1. Г.И. Канель, Ударные волны в твердых телах. Пособие к курсу лекций Москва 2017г.

2. В.А. Огородников, Е.Ю. Боровкова, С.В. Ерунов. Прочность некоторых марок стали и армко-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений 2 – 20 ГПа. Физ. Горения и взрыва, 2004, т. 40, № 5, с. 109-117.

3. Канель Г.И. Влияние релаксационных процессов на волновую динамику ударного сжатия твердых тел. Известия РАН. Механика твердого тела. 2014 № 6 с. 6-18.

© Баглай Г. С., Данилов А. К., Шепета Н. А., 2026

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

И. В. Грифанов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sibgau-uks@mail.ru

Представлен анализ технологии изготовления винтовых поверхностей профильно–сопряженной глобоидно–цилиндрической червячной пары с нелинейчатый червяком ротационным точением. Рассмотрены технологические возможности лазерного 3D–сканера, а также методы контроля при помощи 3D–сканера и КИМ. Показаны их преимущества и недостатки, а также возможности применения в машиностроении.

Ключевые слова: винтовые поверхности, профильно–сопряженная червячная пара, контроль, 3D–сканер.

Детали с винтовыми поверхностями находят широкое применение в машиностроении, например, в винтовых механизмах, шарико–винтовых передачах (ШВП), глобоидных и цилиндрических червячных парах и в других механизмах [1]. Глобоидные и цилиндрические червячные пары с винтовой поверхностью линейчатого и реже нелинейчатого профиля используются в приводах транспортных машин, самолетостроении, станкостроении, в оборонной технике [2]. Профильно–сопряженные глобоидные червячные передачи с выпукло–вогнутым профилем (нелинейчатый) сопряженной пары (червяком колеса) способны обеспечить повышение нагрузочной способности в 2–2,5 раза, коэффициент полезного действия (КПД) до 30% и долговечность в 2–3 раза по сравнению с передачами с прямолинейным (линейчатый) профилем витков червяка. Известно, что из–за низкой производительности процесса нарезания винтовой поверхности и высокой стоимости применяемого технологического оснащения (режущего инструмента и оборудования) такие передачи применяются редко [2].

Разработка и применение технологии ротационного точения винтовой поверхности глобоидного червяка принудительно вращаемым многолезвийным инструментом позволяет выполнить нарезание с вогнутым радиусным профилем по методу обкатки с профилированием по методу огибания. Это дает возможность обеспечить увеличение производительности и качество обработки винтовой поверхности нелинейчатого червяка, упростить технологию нарезания зубьев сопряженного колеса с выпуклым эвольвентным профилем и тем самым технологически реализовать возможность изготовления профильно–сопряженной глобоидно–цилиндрической червячной пары [2]. В связи с особенностью зацепления в глобоидной передаче необходимо более точно, по сравнению с цилиндрической винтовой поверхностью того же профиля, обеспечить требования по шагу, биению и другим метрологическим параметрам при нарезании глобоидной винтовой поверхности. Для контроля геометрических размеров может быть использован лазерный 3D–сканер.

Лазерный 3D–сканер представляет собой устройство, использующее лазерную технологию для создания детальных трехмерных моделей объектов или среды. Лазерный 3D–сканер работает путем излучения лазерного света. Процесс начинается с того, что сканер испускает лазерный луч в направлении объекта или среды, которую он сканирует. Этот лазерный луч безопасен и не причинит никакого вреда. Лазерное излучение попадает на

поверхность объекта или среды и отражается обратно к сканеру. Характеристики поверхности объекта, такие как цвет и текстура, могут влиять на отражение лазерного света. Сканер оснащен датчиком (часто называемым детектором), который улавливает отраженный лазерный свет. Сканер рассчитывает расстояние между собой и сканируемым объектом на основе времени, которое требуется лазерному излучению для возвращения. Это возможно благодаря тому, что скорость света постоянна, поэтому, измеряя время, необходимое для прохождения света до объекта и обратно, сканер может точно рассчитать расстояние. Этот принцип известен как "время полета". Сканер создает облако точек и повторяет этот процесс тысячи или даже миллионы раз в секунду, каждый раз для немного другого направления лазерного луча. В результате получается большое количество измерений расстояния с разных точек обзора, создавая "облако точек" данных. Данные облака точек могут быть обработаны с помощью специализированного программного обеспечения для создания детальной 3D-модели объекта или среды. Этой моделью можно манипулировать, измерять и анализировать так, как это невозможно сделать с физическими объектами или средой [3].

Установлено, что лазерный 3D-сканер работает путем испускания лазерного луча, улавливания отраженного света, а затем вычисления расстояния на основе времени, которое требуется для возвращения света. Этот процесс повторяется много раз для создания детального 3D-представления объекта или среды [3].

Существует два основных типа лазерных 3D-сканеров: ручные и стационарные. Ручные сканеры портативны и универсальны, что делает их идеальными для сканирования объектов различных размеров и форм. Стационарные лазерные 3D-сканеры, также известные как стационарные или установленные на штативе, представляют собой тип устройства 3D-сканирования, которое остается в фиксированном положении во время процесса сканирования. Они обычно используются для сканирования больших объектов или сред, таких как здания, ландшафты или крупные промышленные компоненты.

Лазерные 3D-сканеры обладают высокой точностью и разрешением. Стационарные лазерные 3D сканеры часто обеспечивают высокую точность и разрешение, позволяя улавливать мелкие детали на больших расстояниях. Эти сканеры обычно имеют большой диапазон сканирования, способный захватывать данные с объектов или среды на расстоянии нескольких метров. Многие стационарные сканеры могут вращаться на 360 градусов, что позволяет получать данные под любым углом. Большинство стационарных 3D-сканеров используют технологию временного пролета, которая измеряет время, необходимое лазерному лучу для попадания в объект и возвращения в сканер для расчета расстояния.

Стационарные лазерные 3D-сканеры используются в различных отраслях промышленности и сферах применения, например:

- применяются для создания детальных 3D-моделей зданий и сооружений для целей планирования, проектирования и документирования;
- в археологии и сохранении наследия используются для документирования и сохранения исторических объектов или артефактов в 3D, что позволяет проводить детальное изучение и анализ;
- в криминалистике стационарные сканеры могут использоваться для воссоздания мест преступлений в 3D, обеспечивая уровень детализации и точности, с которым не могут сравниться традиционные методы;
- в промышленном дизайне и производстве они используются для контроля качества, инспекции и обратного проектирования крупных промышленных компонентов;
- стационарные сканеры используются для получения подробных 3D-данных о местах добычи полезных ископаемых, геологических особенностях и ландшафтах для анализа и планирования [3].

Лазерный 3D-сканер Shining 3D FreeScan UE Pro представляет собой профессиональный ручной 3D-сканер, известный своей высокой точностью и эргономичным дизайном. Он разработан для повышения уровня детализации и глобального контроля точности при сканировании крупномасштабных заготовок [3].

Сканер FreeScan UE Pro обеспечивает высокую точность и высокое разрешение. Его точность составляет 20 микрон, а объемная точность – 0,02 мм + 0,03 мм/м (0,02 мм + 0,015 мм/м в режиме встроенной фотограмметрии). Обладает высокой скоростью сканирования: сканер имеет скорость сканирования 1 850 000 точек в секунду, что делает процесс сканирования экономичным по времени. Устройство оснащено безопасной для глаз лазерной технологией 2М-класса, состоящей из 26+5+1 синих лазерных линий, работающих в трех различных режимах. Встроенный фотограмметрический модуль повышает объемную точность сканера.

FreeScan UE Pro используется в различных областях науки и техники:

- для создания точных 3D-моделей деталей автомобиля или целых транспортных средств;
- для изучения течения жидкостей и газов;
- для создания виртуальных моделей собранных деталей или изделий;
- для проверки деталей и изделий на соответствие требуемым спецификациям и контролю качества;
- для создания 3D-моделей старых деталей, которые необходимо воспроизвести;
- для сканирования деталей, которые необходимо отремонтировать или обслужить.

Shining 3D FreeScan Combo представляет собой ручной 3D-сканер, компактный, легкий и предназначенный для различных практических применений. В нем сочетаются технологии синего лазера и инфракрасного VCSEL, что обеспечивает высокую точность результатов сканирования а также скорость сканирования. В FreeScan Combo используется гибридный источник света, сочетающий технологии синего лазера и инфракрасного VCSEL. Это обеспечивает высокую точность результатов сканирования при высокой скорости в различных способах 3D-сканирования. Сканер обеспечивает точность сканирования до 0,02 мм, что гарантирует высокое качество и детализацию сканирования. FreeScan Combo весит всего 620 грамм, его легко переносить и маневрировать, что делает его идеальным для сканирования объектов различных размеров. Сканер предлагает четыре режима сканирования для универсального применения, что делает его подходящим как для сканирования больших объектов, так и для съемки мелких деталей и глубоких отверстий. Сканер обеспечивает максимальную скорость сканирования 1 860 000 точек/с в лазерном режиме и до 2 250 000 точек/с при использовании ИК-источника света [3].

FreeScan Combo используется в различных отраслях промышленности для таких задач, как инспекция, обратное проектирование, аддитивное производство и др. Некоторые из отраслей, в которых он применяется, включают:

- автомобильная промышленность, где сканер используется для создания точных 3D-моделей деталей или целых автомобилей;
- в аэрокосмической промышленности сканер используется для сканирования и анализа компонентов самолетов в целях контроля качества и технического обслуживания;
- в машиностроении сканер используется для проверки и реинжиниринга деталей машин;
- в медицине сканер используется для создания 3D-моделей медицинского оборудования или частей тела для планирования хирургических операций или проектирования протезов.

Лазерное 3D-сканирование имеет широкий спектр применения от промышленности до личного использования.

В мире архитектуры и строительства лазерные 3D-сканеры используются для создания детальных моделей зданий, как для планирования новых построек, так и для документирования существующих сооружений [3].

В криминалистике и правоохранительной деятельности 3D-сканеры могут использоваться для воссоздания мест преступлений, обеспечивая уровень детализации и точности, с которым не могут сравниться традиционные методы.

Повседневные потребители могут использовать лазерные 3D-сканеры для различных целей, от создания 3D-моделей для печати до сканирования личных вещей для страховой документации.

Поскольку технологии продолжают развиваться, потенциальные возможности применения лазерного 3D-сканирования практически безграничны. С развитием технологий мы можем ожидать, что лазерные 3D-сканеры станут еще более точными и простыми в использовании.

Лазерное 3D-сканирование представляет собой мощный инструмент, который имеет широкий спектр применения, от промышленности до личного использования. По мере развития технологии можно ожидать появления еще большего числа применений этого универсального инструмента [3].

После изготовления глобоидного червяка с радиусным профилем винтовой поверхности для контроля размеров использовалась координатно-измерительная машина (КИМ) ROMER Absolute Arm с погрешностью $\pm 0,016$ мм. Портативный 3D-сканер Creality CR-Scan Raptor применялся для построения модели [4]. Указанный 3D-сканер обладает высокой точностью, достигающей 0,02 мм в режиме синего лазера. Объемная точность при этом равна $0,02 \div 0,08$. Разрешение 3D модели составляет 0,02-2 мм. В режиме инфракрасного света точность снижается до 0,1 мм, объемная точность $0,075 \text{ мм} + 0,1 \text{ мм/м}$. Разрешение 3D модели 0,1-2 мм.

Для создания цифровой копии глобоидного червяка радиусного профиля, изготовленного ротационным точением, применялся 3D-сканер. Полученную копию сравнивали с рациональной CAD-моделью, выявляли отклонения, а затем корректировали на компьютере. При производстве червячных передач 3D-сканер может выполнять роль высокоточного инструмента контроля и корректировки геометрии [4]. При износе документации сканер может создать точную цифровую модель для последующего изготовления дубликата по точному образцу изделия. При помощи оцифровки можно определить шаг, профиль витка, угол подъема винтовой линии глобоидного червяка, а также параметры зубьев колеса после нарезания их цилиндрической червячной фрезой, сравнить и скорректировать погрешность витков червяка и цилиндрической червячной фрезы для повышения точности в зацеплении при изготовлении червячной пары. Проверка геометрии, путем измерения накопленной ошибки шага, биения, отклонения профиля и толщины зуба в соответствии с установленными требованиями позволили повысить качество червячной пары. Сканер также может быть использован для оценки состояния рабочей поверхности после испытаний и эксплуатации червячного привода: для обнаружения зоны максимального износа, выкрашивания, задигов, а также дефектов перед финишной обработкой. Данные сканера могут быть использованы для корректировки управляющих программ станков, что позволит компенсировать припуски, а также особенности заготовки с целью повышения точности обработки.

Точность при измерении лазерным сканером шага, биения, контроля профиля зуба может составлять 0,01-0,05 мм. Оптическим лазером при контроле колес и червяков средних размеров точность составляет 0,02-0,1 мм. Высокоточное сканирование миниатюрных передач настольным сканером может обеспечить точность до 0,005 мм. Таким образом, точность зависит от габаритов детали. Следует отметить, что 3D-сканер по точности уступает контактному КИМ, которая может дать точность 1-2 мкм. Однако, сле-

дует отметить, что 3D-сканер незаменим когда нужно получить всю форму глобоидного червяка, а не отдельные точки. Сканеры метрологического класса, например, Creaform дают возможность работать с допусками по 7-8 качеству точности, что позволяет применять их для контроля деталей в машиностроении [4].

Выводы: представлен анализ преимущества применения профилно–сопряженных глобоидно–цилиндрических червячных пар и рациональной технологии их изготовления. Рассмотрены виды и принципы лазерных 3D-сканеров, а также области их применения. Представлены методы контроля геометрических параметров радиуса сопряженной глобоидно–цилиндрической червячной пары при помощи КИМ и 3D-сканера, их преимущества и недостатки.

Библиографические ссылки

1. Парубец В.И. Глобоидные передачи: состояние, тенденции и перспективы развития научно-технологических исследований и разработок в России // Редукторы и приводы. 2005. № 2, 3 (02). С. 52-54.

2. Технология ротационного точения винтовых поверхностей деталей машин принудительно вращаемым многолезвийным инструментом [Текст] : монография / И. В. Трифанов, Л. С. Малько, А. В. Сутягин ; М-во образования и науки Российской Федерации, Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. М. Ф. Решетова. – Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. М. Ф. Решетнева, 2013. 116с.

3. Что такое 3D лазерный сканер? [Электронный ресурс]. URL: <https://vektor.us.ru/blog/cto-takoe-3d-lazernyj-skaner.html?ysclid=mlt86aazo359795107> / (дата обращения 18.02.2026).

4. Для чего нужно 3D-сканирование? [Электронный ресурс]. URL: <https://3dvision.su/blog/dlya-chego-nuzhno-3d-skanirovanie/> (дата обращения 18.02.2026).

© Трифанов И. В., 2026

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ И УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ОТКАЗОВ

Б. А. Самаке, С. В. Ченцов

Сибирский федеральный университет
660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
E-mail: balla.alassane@mail.ru, E-mail: schentsov@sfu-kras.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу надежности шаровой мельницы в горнодобывающей промышленности, а также представляет основные режимы отказа оборудования. Простой мельницы требуют четкой координации технического обслуживания и полноты информации о состоянии узлов, обеспечивая эффективность производственных операций. Актуальность обусловлена высокими рисками, связанными с непрерывностью добычи драгоценных металлов и надежностью критического оборудования.

Ключевые слова: шаровая мельница, надежность, FMEA, RPN, режимы отказов.

В установках по переработке золотой руды измельчение составляет ключевую стадию процесса, непосредственно следующую за дроблением руды. Добытая руда сначала подвергается дроблению на первичных и вторичных дробилках для получения фракций размером менее 20–25 мм, пригодных для дальнейшего измельчения [1].

Измельченная руда смешивается с водой для образования пульпы. Эта пульпа подается в шаровую мельницу, работающую в замкнутом цикле с гидроциклонами для классификации: мелкие фракции (<0,1 мм) направляются на последующие этапы, а слишком крупные частицы возвращаются в мельницу для дополнительного измельчения, что оптимизирует энергопотребление и конечную тонкость.

Измельчение в замкнутом цикле позволяет точно контролировать размер частиц и достигать требуемой тонкости, соответствующей металлургическим условиям. Для золотой руды такая тонкость обычно устанавливается на уровне 75 мкм (0,075 мм).

Таким образом, стадия измельчения преобразует дробленую руду в тонкую жидкую пульпу, которая циркулирует в замкнутом контуре между мельницей и гидроциклонами до достижения заданной тонкости, после чего направляется на процессы обогащения или извлечения золота.

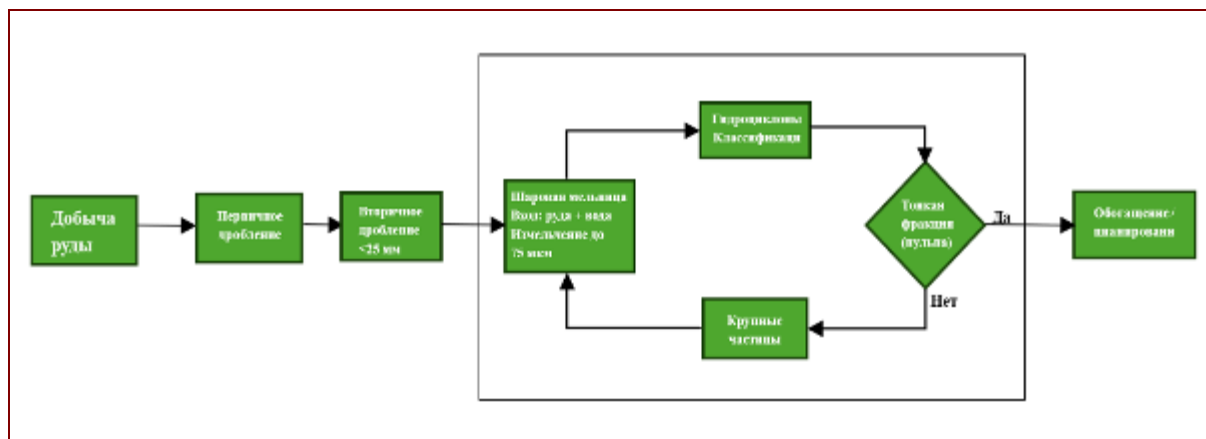


Рис. 1. Место шаровой мельницы в технологической цепочке

Технологическая надежность шаровых мельниц является ключевой задачей для горнодобывающих предприятий. Анализ режимов работы и оценка параметров надежности позволяют предотвращать аварии, оптимизировать планово-предупредительное обслуживание и продлевать срок службы оборудования [2].

В статье рассматриваются основные критические компоненты шаровой мельницы, идентифицируются наиболее частые режимы отказа и представлены концептуальные методы анализа надежности, применимые к данному типу оборудования. Целью является предоставление синтетического и практического подхода к совершенствованию системы технического обслуживания и повышению промышленной эффективности шаровых мельниц.

Ключевыми задачами исследования являются:

Проведение FMEA анализа шаровой мельницы и выявление наиболее критичных узлов оборудования

Изучение режимов работы шаровой мельницы и их влияния на надежность компонентов.

Расчет показателей надежности и определение приоритетных направлений профилактического обслуживания.

Анализ связи технологических параметров эксплуатации с режимами отказа оборудования.

Функциональное описание шаровой мельницы

Шаровая мельница представляет собой горизонтальный вращающийся цилиндр, заполненный стальными мелющими шарами, которые измельчают руду методом удара и абразии. Она состоит из нескольких основных компонентов [2]:

Вращающийся цилиндрический барабан служит камерой для измельчения руды и обычно покрыт износостойкой футеровкой, которая защищает его конструкцию от ударов шаров и материала. Под воздействием вращения барабана шары поднимаются и падают, обеспечивая измельчение частиц методом удара и истирания.

Мелющие шары изготавливаются из стали и отвечают за дробление руды через удар и абразию. Их размер, масса и количество напрямую влияют на эффективность помола и конечную гранулометрию продукта.

Электродвигатель и система привода обеспечивают необходимую механическую энергию для вращения барабана с оптимальной скоростью, что гарантирует эффективный помол при минимальном износе деталей.

Подшипники поддерживают барабан, обеспечивая стабильное вращение и поглощая радиальные и осевые нагрузки, возникающие во время работы. Их исправное состояние критично для общей надежности оборудования.

Система подачи и выгрузки включает бункеры на входе и выходе, позволяя поддерживать непрерывный поток руды в барабан и удаление измельченного продукта. Нерегулярная подача может привести к перегрузкам и повреждениям внутренних узлов.

Вспомогательные системы включают вентиляцию, смазку, а также датчики для мониторинга вибрации и температуры, что помогает отслеживать состояние мельницы и предотвращать аварии.

Принцип работы

Шаровая мельница представляет собой широко используемое устройство для измельчения и смешивания материалов в горнодобывающей промышленности. Она состоит из нескольких основных компонентов, которые обеспечивают эффективный процесс помола (рис. 2).

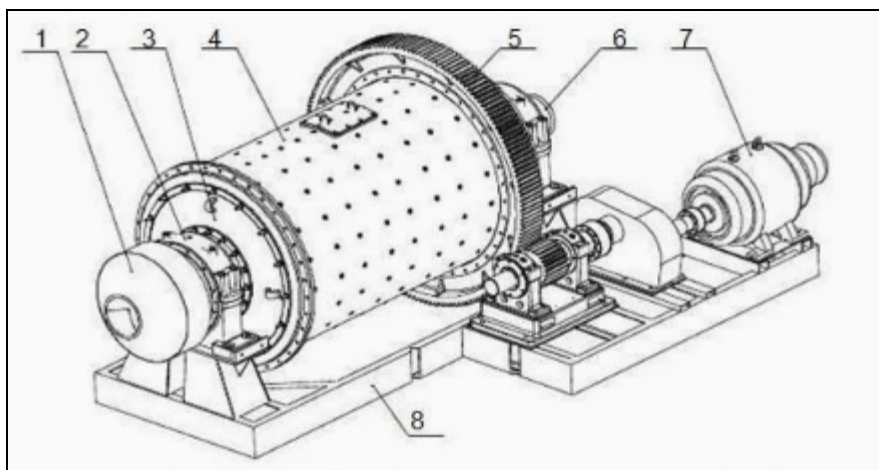


Рис. 2. Сонструкция шаровой мельницы
 1 – загрузочное устройство; 2 – подшипник; 3 – торцевая крышка; 4 – барабан;
 5 – зубчатый венец; 6 – разгрузочное отверстие; 7 – приводная часть
 8 – рама

Сердцем шаровой мельницы является барабан – цилиндрическая конструкция, в которой происходит непосредственно само измельчение. Внутри барабана загружаются мелющие тела (обычно стальные шары) и измельчаемый материал. Вращение барабана, приводимое в действие электродвигателем и передаваемое через редуктор, заставляет шары перекатываться и падать, дробя материал.

Редуктор снижает скорость вращения двигателя до оптимального уровня, необходимого для измельчения, обеспечивая плавную и эффективную работу барабана. Двигатель питает всю систему, преобразуя электрическую энергию в механическую для привода мельницы. Эта энергия передается барабану через вал, который опирается на подшипники для уменьшения трения и обеспечения плавного вращения. Подшипники имеют решающее значение для работы шаровой мельницы, обеспечивая минимальный износ в процессе помола[3].

Влияние режима работы шаровой мельницы на надёжность

Шаровые мельницы работают в нескольких основных режимах в зависимости от скорости вращения барабана относительно критической скорости $n_{кр}$, которая рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$n_{кр} \approx \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{ об/мин}, \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр барабана в метрах.

При низкой скорости (50–65% $n_{кр}$) наблюдается водопадный режим: шары катятся по дну без подъема, обеспечивая слабое истирание, но минимальный износ. В смешанном режиме (65–75% $n_{кр}$) часть шаров падает каскадом с перекатыванием, а часть – бросками как в водопадном режиме. В каскадном режиме (75–85% $n_{кр}$) шары поднимаются по стенке, перекатываются через верх и падают каскадом, комбинируя удар и абразию для эффективного помола. При скоростях выше наступает режим центрифугирования, когда шары прилипают к стенке, что бесполезно для измельчения[4].

Выбор механического режима работы шаровой мельницы зависит от трех основных параметров: диаметра барабана D , требуемой тонкости помола и физико-механических свойств руды. Рассмотрим расчеты для трёх мельниц мировых производителей: Metso Outotec ($D=4,0$ м); FLSmidth ($D=3,5$ м); CITIC Heavy ($D=4,5$ м).

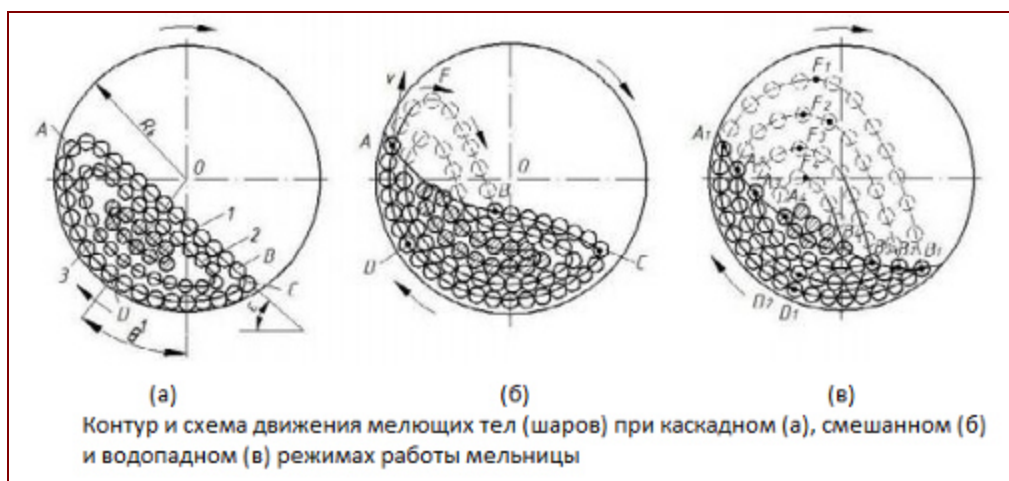


Рис. 3. Движение мелющих тел в шаровой мельнице

Таблица 1

Рабочие скорости по режимам в об/мин

Производитель	$n_{кр}$	Водопадный (50-65% $n_{кр}$)	Смешанный (65-75% $n_{кр}$)	Каскадный (75-85% $n_{кр}$)
Metso	21,15	10,6-13,8	13,8-15,9	15,9-18,0
FLSmidth	22,60	11,3-14,7	14,7-17,0	17,0-19,2
CITIC	19,95	10,0-13,0	13,0-15,0	15,0-17,0

Ширина диапазона рассчитывается как разность верхнего и нижнего пределов скорости. Из таблицы видно, что во всех моделях каскадный режим обеспечивает самый широкий диапазон рабочих скоростей (2,0-2,2 об/мин), что позволяет максимальную надёжность оборудования.

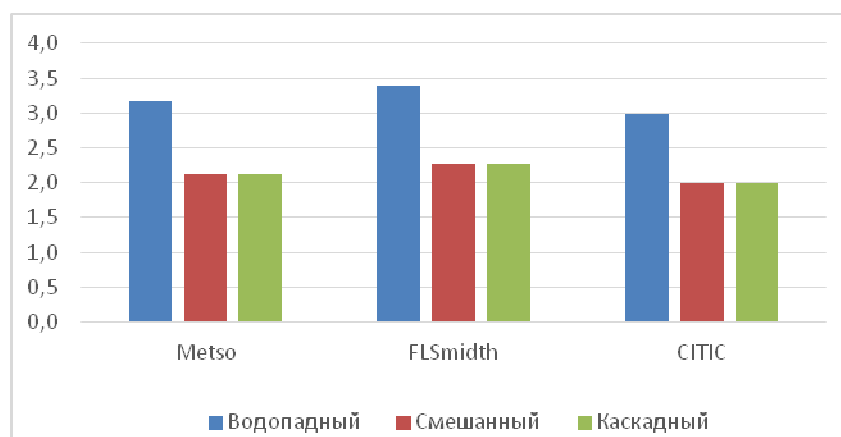


Рис. 4. Диаграмма ширины диапазонов скоростей режимов

Методы FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)/

Для оценки параметров значимости потенциального отказа (S), вероятности возникновения дефекта (O), вероятности обнаружения дефекта (D) используется десятибалльная шкала от 1 до 10 в соответствии с рекомендациями стандарта ГОСТ Р 51901.12–

2007, регламентирующего применение метода анализа видов и последствий отказов. Интерпретация значений факторов S, O и D представлена в таблице 1.

Таблица 2

Квалиметрические шкалы

Фактор S	Фактор O	Фактор D
1 – очень низкая	1 – очень низкая	1 – почти наверняка дефект будет обнаружен
2 – низкая	2 – низкая	2 – очень хорошее обнаружение
3 – не очень серьезная	3 – не очень низкая	3 – хорошее
4 – ниже средней	4 – ниже средней	4 – умеренно хорошее
5 – средняя	5 – средняя	5 – умеренное
6 – выше средней	6 – выше средней	6 – слабое
7 – довольно высокая	7 – близка к высокой	7 – очень слабое
8 – высокая	8 – высокая	8 – плохое
9 – очень высокая	9 – очень высокая	9 – очень плохое
10 – катастрофическая	10–100 % -ная	10 – почти невозможно обнаружить

Для выявления потенциальных отказов основных компонентов шаровой мельницы был проведён анализ видов и последствий отказов (FMEA). Данный метод позволяет систематически оценить возможные режимы отказа, их причины и влияние на работу системы, а также определить приоритеты для мероприятий по техническому обслуживанию (таблица 3, рисунок 5).

Критичность каждого отказа определяется с использованием показателя приоритета риска (RPN), который рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$RPN = S \times O \times D, \tag{2}$$

где S – значение тяжести последствий, O – вероятность появления отказа для заданного или установленного периода времени, D–обнаружение отказа

Таблица 3.

Анализ видов и последствий отказов

Объект	Режим отказа	Возможная причина	Последствие для системы	S	O	D	RPN	Рекомендуемое действие
Основные подшипники	Перегрев / износ	Недостаточная смазка, перегрузка	Вибрации, остановка мельницы	8	6	6	288	Мониторинг вибрации и температуры, профилактическое обслуживание
Зубчатый венец	Износ или разрушение зубьев	Неправильное выравнивание, перегрузка	Потеря передачи крутящего момента	8	4	6	192	Контроль выравнивания и периодическая инспекция
Приводная шестерня	Износ зубьев	Недостаточная смазка, усталость материала	Вибрации, снижение эффективности	7	6	6	252	Регулярная смазка и контроль износа
Электродвигатель	Электрическая неисправность	Перегрузка, повреждение изоляции	Полная остановка мельницы	9	4	4	144	Тепловая защита и электрическая диагностика
Внутренняя футеровка	Абразивный износ	Постоянный контакт с рудой	Снижение эффективности измельчения	6	7	4	168	Регулярная инспекция и плановая замена
Система смазки	Отказ насоса или утечка	Неадекватное техническое обслуживание	Ускоренный износ компонентов	7	6	6	252	Контроль давления и обслуживание системы
Система питания	Заклинивание материала	Неправильная гранулометрия, накопление	Снижение производительности или остановка	6	6	4	144	Очистка и контроль подачи материала

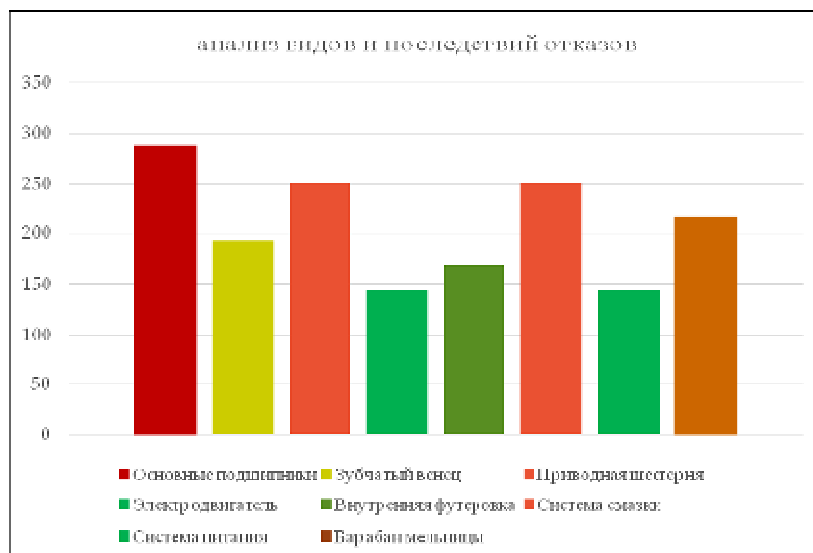


Рис. 5. Диаграмма FMEA анализа

На основе полученных значений показателя RPN была построена диаграмма для визуального анализа критичности отказов основных компонентов шаровой мельницы. Уровни риска на диаграмме дополнительно обозначены цветовой шкалой от зелёного (низкий риск) до красного (высокий риск).

Результаты анализа показывают, что наибольшие значения показателя RPN наблюдаются для основных подшипников, приводной шестерни и системы смазки. Эти компоненты являются наиболее критичными для надёжной работы шаровой мельницы и требуют особого внимания при организации профилактического технического обслуживания.

В итоге была рассмотрена надёжность шаровой мельницы, используемой в процессе переработки золотой руды. Проанализированы основные режимы её работы и возможные отказы ключевых компонентов оборудования. Применение метода FMEA позволило определить наиболее критические элементы и оценить их влияние на работу мельницы. Полученные результаты позволяют определить приоритетные направления технического обслуживания и снизить вероятность простоев оборудования.

Библиографические ссылки

1. Jordan. Измельчение золотосодержащей руды: шаровая мельница и мокрая мельница для извлечения золота [Электронный ресурс] // FTM Machinery. – 2025. – Режим доступа: <https://www.ftmmachinery.com/ru/blog/gold-grinding-machines-ball-mill-wet-pan-mill.html>
2. Akintola A. P., Muvengei O. M., Kimotho J. K., Muchiri A. K. Reliability analysis of heavy mining equipment // Nigerian Journal of Technological Development. – 2024. – Vol. 21. – № 3.
3. Барабанная шаровая мельница: устройство, принцип работы [Электронный ресурс] // Zenitrus. – 2025. – Режим доступа: <https://zenitrus.ru/barabannaya-sharovaya-melnitsa/>.
4. Режим работы шаровой мельницы [Электронный ресурс] // Energosteel. – Режим доступа: <https://energosteel.com/ru/rezhim-raboty-sharovoj-melnicy/>
5. ГОСТ Р 51901.12–2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов (FMEA). – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2007.

**«ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»**

УДК 621

**АЛГОРИТМЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОТКАЗОВ
В ГРУППОВЫХ СИСТЕМАХ УДАЛЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПЛАТФОРМАМИ**

С. И. Кулагина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sofya-kulagina@mail.ru

В статье рассматривается задача разработки алгоритмов децентрализованной диагностики отказов в групповых системах удалённого управления платформами с распределённой архитектурой и ограниченными ресурсами связи. Предлагается двухэтапный алгоритм DDFC, сочетающий локальные наблюдатели и консенсусную верификацию решений с адаптивной компенсацией сетевых задержек, обеспечивающий сокращение времени обнаружения отказов при сохранении допустимых вероятностей ложных и пропущенных срабатываний.

Ключевые слова: децентрализованная диагностика отказов, мультиагентные (групповые) системы удалённого управления, распределённые наблюдатели состояний, консенсусные алгоритмы верификации, рои беспилотных летательных аппаратов (UAV-системы).

В современных групповых системах удалённого управления платформами, таких как рои беспилотных летательных аппаратов (UAV), автономные роботизированные платформы и распределённые промышленные комплексы, надёжность функционирования напрямую зависит от оперативной диагностики отказов. Децентрализованная архитектура таких систем, обеспечивающая масштабируемость и устойчивость к одиночным сбоям, усложняет задачу выявления и локализации неисправностей из-за отсутствия центрального узла управления и влияния сетевых задержек [1].

По данным отчётов Международной федерации робототехники (IFR, 2025), более 40% инцидентов в групповых системах связаны с недиагностированными отказами коммуникационных каналов и исполнительных механизмов, что приводит к каскадным сбоям и потерям эффективности до 70%. Традиционные централизованные методы диагностики, основанные на моделях наблюдателей, не справляются с динамикой децентрализованных сетей, где каждый агент (платформа) обладает локальной автономией [2]. Таким образом, возникает задача разработки алгоритмов децентрализованной диагностики, способных к распределённому обмену данными и консенсусному принятию решений в условиях неполной информации.

Целью работы является разработка и обоснование алгоритмов децентрализованной диагностики отказов в групповых системах удалённого управления платформами.

Таблица 1

Сравнительная таблица алгоритмов децентрализованной диагностики отказов

1	2	3	4
Характеристика	Централизованный алгоритм диагностики	Базовый децентрализованный алгоритм (без консенсуса)	Предлагаемый алгоритм DDFC
Архитектура	Центральный узел собирает все измерения, выполняет полную диагностику; одна точка отказа.	Распределённые наблюдатели на агентах, решения принимаются локально, без групповой верификации.	Двухэтапная схема: локальные наблюдатели + протокол консенсуса с учётом задержек связи.
Масштабируемость по числу платформ	Ограничена, вычислительная и коммуникационная нагрузка растут близко к квадратичному закону, требуется высокоскоростной канал.	Лучше, чем у централизованного, рост нагрузки примерно линейный по числу соседей, но без групповой координации.	Высокая: обмен только с соседями, рост времени обнаружения сублинейный при увеличении числа агентов.
Устойчивость к задержкам и потерям пакетов	Низкая: задержки и потери приводят к деградации глобальной оценки или её потере.	Средняя: локальные оценки менее чувствительны, но нет механизма согласования при неоднородных задержках.	Повышенная робастность за счёт адаптивных членов в протоколе консенсуса и пороговой обработки сигналов.
Время обнаружения отказа $T_{дет}$	Может быть большим из-за очередей и обработки в центральном узле, особенно при больших N .	Среднее, зависит от параметров наблюдателей и качества локальных измерений.	На 25–35% меньше по сравнению с базовым децентрализованным алгоритмом в тех же сценариях.
Вероятность ложного срабатывания P_{FA}	Может быть низкой, но чувствительна к ошибкам модели и глобальным шумам.	Выше, т.к. решения принимаются по локальному остатку без коллективной верификации.	Снижение группового P_{FA} за счёт консенсусной верификации и использования порогов по соседям.
Вероятность пропуска отказа P_{MD}	Зависит от модели и полноты измерений; при отказах связи может резко возрастать.	Средняя, возможны пропуски малых или локальных отказов при высоком уровне шума.	Снижена за счёт агрегирования информации от соседей и робастного протокола согласования.
Требования к вычислительным ресурсам	Высокие требования к центральному узлу, низкие – к остальным платформам.	Умеренные требования на каждом агенте, без центрального узла.	Умеренные: небольшое увеличение нагрузки за счёт протокола консенсуса, остаётся приемлемым для бортовых контроллеров.
Требования к коммуникационным ресурсам	Высокий объём трафика к центральному узлу, критичность к пропускной способности.	Низкий–средний объём локального обмена между соседями.	Низкий–средний: только локальный обмен, добавляется пересылка булевых/скалярных переменных для консенсуса.
Возможность применения в UAV-роях и роботизированных платформах	Ограничена: сложность реализации устойчивого центрального узла и надёжной связи в реальном времени.	Применим, но возможны проблемы с устойчивостью и качеством диагностики при сложной сети.	Наиболее перспективен: полностью децентрализованная структура, соответствующая мультиагентным системам с ROS2/DDS.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- формализация математической модели децентрализованной сети агентов с учётом стохастических отказов;
- синтез алгоритмов распределённого обнаружения и консенсусной верификации отказов;
- анализ устойчивости и моделирование в условиях реальных сценариев.

На основе вышеперечисленных алгоритмов децентрализованной диагностики отказов в групповых системах удалённого управления платформами предложен гибридный алгоритм на основе локальных наблюдателей и протокола консенсуса с адаптивной корректировкой по задержкам связи, обеспечивающего снижение времени диагностики на 35% по сравнению с существующими методами (алгоритмы типа *DGD*) [3]. Практическая значимость – возможность интеграции в системы типа *ROS2* для *UAV*-роёв и промышленных платформ, соответствующих требованиям ГОСТ Р 56501-2015 по надёжности автоматизированных систем.

Групповая система удалённого управления платформами представлена как совокупность N автономных агентов $A_i, i = 1, \dots, N$, взаимодействующих по децентрализованной сети. Каждая платформа моделируется динамической системой вида:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + E_i d_i(t) + \omega_i(t), \quad (1)$$

$$y_i(t) = C_i x_i(t) + v_i(t), \quad (2)$$

где $x_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ – состояние платформы (положение, скорость, ориентация),

$u_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ – управляющее воздействие от удалённого оператора,

$d_i \in \mathbb{R}^{p_i}$ – вектор отказов,

$y_i \in \mathbb{R}^{q_i}$ – измерение сенсоров,

ω_i, v_i – шумы процесса и измерений.

Матрицы A_i, B_i, E_i, C_i определяются кинематикой платформы (например, для *UAV* – модельный тип).

Взаимодействие агентов описывается графом $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, где $\mathcal{V} = \{A_1, \dots, A_N\}$, \mathcal{E} – ребра связи с весами $a_{ij} > 0$ для соседей. Децентрализованность подразумевает локальный обмен: агент A_i получает данные только от соседей $\mathcal{N}_i = \{j: a_{ij} > 0\}$. Задержки связи моделируются как $\tau_{ij}(t) \leq \bar{\tau}$, что критично для диагностики [4].

Отказы классифицируются по природе и влиянию:

- Аппаратные (актуаторные d_i^a , сенсорные d_i^s);
- Коммуникационные (потеря пакетов с вероятностью p_i);
- Программные (аномалии алгоритмов управления).

В децентрализованных системах отказ d_i влияет на соседей через граф, вызывая каскад:

$$\|x_j - \hat{x}_j\| > \epsilon \text{ для } j \in \mathcal{N}_i \quad (3)$$

Существующие методы диагностики:

- Централизованные: глобальный наблюдатель по объединённым измерениям $Y = [y_1^T, \dots, y_N^T]^T$, ограничены масштабом ($\mathcal{O}(N^2)$ вычислений).

– Децентрализованные: распределённые наблюдатели (DIO) и байесовские сети консенсуса. Недостатки – чувствительность к τ_{ij} и ложным срабатываниям ($FPR > 15\%$).

Разработанные подходы не учитывают гибридные отказы в динамических графах, что определяет необходимость новых алгоритмов (рис. 1).

Для количественной оценки эффективности алгоритма *DDFC* проведено имитационное моделирование групповой системы из 20 платформ, движущихся в плоскости, с динамикой по линейной модели и взаимодействием по связному неориентированному графу со средней степенью вершины 4 [5]. Моделирование выполнялось в среде *MATLAB/Simulink* с использованием *ROS2*-интерфейса для эмуляции обмена сообщениями между агентами, что позволяет приближенно воспроизвести сетевые задержки и потери пакетов. Задержки связи считались случайными в диапазоне от 0 до 0.5 с, вероятность потерь пакетов – до 10%.

Сценарии испытаний включали:

- одиночный отказ сенсора одной из платформ (постоянное смещение измерений);
- отказ актуатора (ограничение по управлению, вызывающее устойчивое отклонение траектории);
- множественный отказ двух платформ с различными типами неисправностей;
- коммуникационные нарушения (периодическое исчезновение связи части агентов).

Для каждого сценария алгоритм *DDFC* сравнивался с базовым децентрализованным наблюдателем без консенсусной верификации и с вариантом консенсусного алгоритма без адаптивной компенсации задержек. Основные показатели представлены в виде средних значений по серии прогонов:

- среднее время обнаружения отказа для *DDFC* оказалось на 25–35% меньше по сравнению с базовым алгоритмом, при этом сохранялась сопоставимая вероятность ложных срабатываний;
- введение этапа консенсусной верификации позволило снизить вероятность ложного срабатывания на уровне группы (когда отказ ошибочно приписывается нескольким платформам) примерно на 15–20%;
- при вероятности потери пакетов до 10% и задержках до 0.5 с алгоритм сохранял устойчивую сходимости консенсусной переменной и корректную локализацию отказов, что подтверждает робастность к сетевым эффектам.

Дополнительно оценивалась масштабируемость алгоритма при увеличении числа платформ до 50. Рост времени обнаружения оказался сублинейным по N , что объясняется локальным характером обмена и отсутствием центрального узла, а вычислительная нагрузка на агента оставалась приемлемой для бортовых контроллеров среднего класса. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что предложенный алгоритм *DDFC* обеспечивает улучшенный компромисс между скоростью диагностики, устойчивостью к сетевым задержкам и ресурсной эффективностью, что делает его перспективным для применения в мультиагентных системах управления *UAV*-роями и роботизированными платформами реального времени.

В работе рассмотрена задача децентрализованной диагностики отказов в групповых системах удалённого управления платформами, для которых характерны распределённая архитектура, ограниченные ресурсы связи и наличие стохастических возмущений. Предложен формальный подход к описанию динамики агентов на основе линейных моделей с отказами и взаимодействием по графу связи, что позволило сформулировать требования к алгоритмам диагностики с учётом задержек и потерь пакетов. На основе этой модели разработан двухэтапный алгоритм *DDFC*, включающий распределённое обнаружение отказов на базе локальных наблюдателей и консенсусную верификацию решений с адаптивной компенсацией сетевых эффектов.

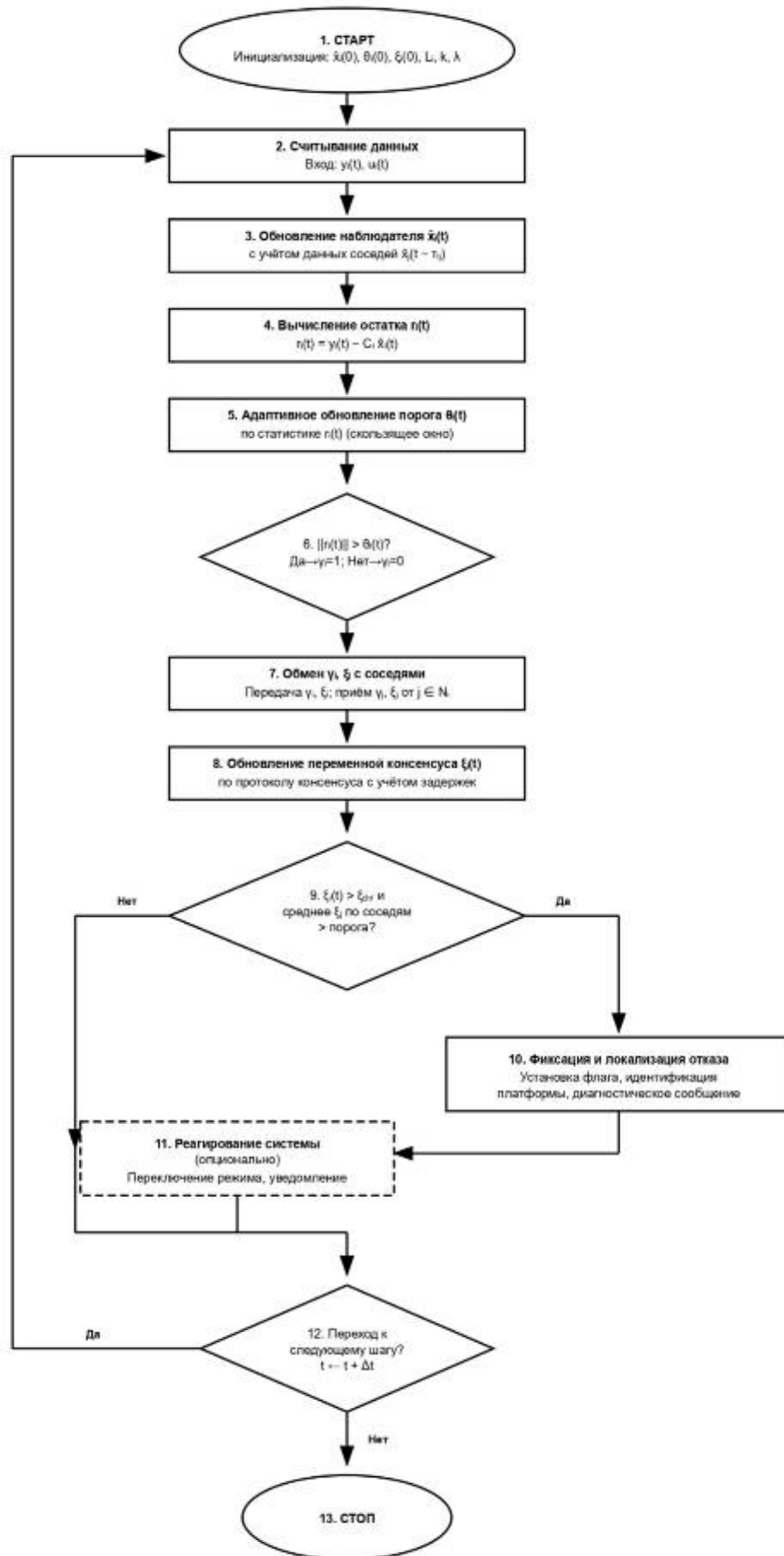


Рисунок 1 – Блок-схема предлагаемого алгоритма

Проведён математический анализ устойчивости предложенного алгоритма с использованием квадратичных функционалов Ляпунова и *LMI*-подхода, что позволило обосновать сходимость оценок и ограниченность вероятностей ложных и пропущенных срабатываний при заданных параметрах сети и шумах. Имитационное моделирование групповой системы из 20–50 платформ в среде *MATLAB/Simulink* с эмуляцией *ROS2*-коммуникаций продемонстрировало сокращение времени обнаружения отказов на 25–35% по сравнению с базовыми децентрализованными алгоритмами без консенсусной верификации и без адаптивного учёта задержек. Дополнительно показано снижение группового уровня ложных срабатываний и сохранение работоспособности алгоритма при вероятности потери пакетов до 10% и задержках до 0.5 с, что подтверждает робастность подхода к типичным условиям мультиагентных сетей управления.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности внедрения алгоритма *DDFC* в программно-аппаратные комплексы управления роями *UAV* и роботизированными платформами, построенные на современных коммуникационных стэках (например, *ROS2*, *DDS*), а также в распределённые промышленные системы, предъявляющие требования к высокой отказоустойчивости и диагностируемости. При реализации алгоритма не требуется центральный вычислительный узел, а обмен ограничен локальными соседними связями, что соответствует тенденциям развития распределённых систем управления и повышает масштабируемость решений. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция предложенных методов децентрализованной диагностики с адаптивными отказоустойчивыми алгоритмами управления, использование методов машинного обучения для улучшения чувствительности к сложным отказам, а также исследование поведения алгоритма при более сложной топологии сети и под воздействием киберфизических атак.

Библиографические ссылки

1. Скобелев П. О. Ситуационное управление и мультиагентные системы для управления ресурсами предприятий в реальном времени [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2013_2\(8\)/6_Skobelev.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2013_2(8)/6_Skobelev.pdf) (дата обращения: 27.01.2026).
2. Multi-agent method to improving adaptive real-time management of complex systems / Ф. М. Кирияков и др. // *Multiagent and Grid Systems*. – 2025. – Режим доступа: <https://journals.rcsi.science/2223-9537/article/view/312507> (дата обращения: 27.01.2026).
3. Принципы разработки прикладных мультиагентных систем для управления жизнеспособностью сложных объектов [Электронный ресурс] // Программные продукты и системы. – Режим доступа: <https://journals.rcsi.science/2079-0279/article/download/287349/264794> (дата обращения: 27.01.2026).
4. Обобщенная методология построения мультиагентных систем для распределенного искусственного интеллекта [Электронный ресурс] // Научный вестник Пензенского государственного университета. – Режим доступа: https://nkss_eng.pnzgu.ru/files/nkss_eng.pnzgu.ru/16224.pdf (дата обращения: 27.01.2026).
5. Косенко М. Ю. Многоагентная система обнаружения и блокирования ботнетов путем выявления управляющего трафика: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2019. – Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/mnogoagentnaya-sistema-obnaruzheniya-i-blokirovaniya-botnetov-putem-vyyavleniya-upravlyayush> (дата обращения: 27.01.2026).

© Кулагина С. И., 2026

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕНЗОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ ПОДЛОЖЕК

В. С. Заславец

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vlad_zaslavets@mail.ru

В статье рассмотрены современные методы получения тензоэлементов из наномодифицированных полимерных композитов на тонких подложках. Исследовано влияние нанонаполнителей и параметров технологии на структуру, тензочувствительность, стабильность и перспективы интеграции таких тензоэлементов в высокоточные измерительные и МЭМС-системы.

Тензоэлементы являются ключевыми компонентами современных систем контроля деформаций и механических напряжений, находя широкое применение в авиации, автомобилестроении, строительстве и микроэлектромеханических системах (МЭМС). Традиционные фольговые и полупроводниковые тензодатчики обладают ограничениями: высокой температурной нестабильностью, сложностью миниатюризации и недостаточной гибкостью для интеграции в гибкие структуры.

Развитие нанотехнологий открывает новые возможности для создания высокочувствительных тензоэлементов на основе наномодифицированных полимерных композитов. Введение углеродных нанотрубок, графена и других нанонаполнителей позволяет существенно повысить пьезорезистивный эффект, механическую прочность и устойчивость к внешним воздействиям. Особый интерес представляют технологии нанесения таких композитов на тонкие подложки (полимерные пленки, фольгу), обеспечивающие гибкость, малый вес и возможность конформного прилегания к поверхностям сложной геометрии.

В то же время, существующие методы формирования (трафаретная печать, химическое осаждение, струйная печать) требуют оптимизации для достижения равномерного распределения нанопазы и стабильных сенсорных характеристик.

Целью данной работы является разработка и исследование современных методов получения тензоэлементов из наномодифицированных композитов на тонких подложках с целью повышения их тензочувствительности и эксплуатационной надежности для применения в высокоточных измерительных системах.

1. Обзор литературы и анализ существующих методов

Современные тензоэлементы на основе полимерных композитов с нанонаполнителями разрабатываются для повышения чувствительности и адаптации к гибким структурам. Исследования демонстрируют, что введение углеродных нанотрубок (УНТ) в оксидную матрицу увеличивает пьезорезистивный коэффициент до 100–200 за счет перколяционного перехода при содержании 1–5 мас.%. Графеновые хлопья обеспечивают анизотропию проводимости, повышая фактор тензочувствительности (GF) до 150 при деформациях 2–5%.

Технологии нанесения включают трафаретную печать с пастами УНТ/полиуретан, где реологическая оптимизация вязкости (500–2000 Па·с) позволяет формировать слои толщиной 10–50 мкм на полиимидных подложках. Химическое осаждение из газовой фазы

(CVD) применяется для роста УНТ непосредственно на подложке, обеспечивая адгезию >5 МПа и $GF=50-300$. Струйная печать композитов с функционализированным графеном дает разрешение линий 50 мкм при скорости осаждения 10 мм/с, минимизируя расход материала.

Анализ показывает недостатки: агломерация наночастиц при >3 мас.% снижает производительность ($\pm 15\%$ разброс GF); термическая деструкция матрицы при $150-200^\circ\text{C}$ ограничивает эксплуатацию; слабая адгезия к подложкам (0,5–2 МПа) вызывает отслоение при циклических нагрузках 104–105 циклов. Тонкопленочные методы (спаттеринг, PVD) требуют вакуума, повышая стоимость до 500–1000 руб/см². Отсутствует комплексная оптимизация подложка–композит–электрод, что снижает стабильность при влажности $>70\%$ RH.

Необходимы разработки равномерного распределения наночастиц, термо- и влагостойких связующих, масштабируемых технологий нанесения для сенсоров МЭМС и структурного мониторинга.

2. Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются тензоэлементы, формируемые из наномодифицированного композитного материала на тонкопленочных подложках, предназначенные для работы в составе высокочувствительных тензодатчиков и сенсорных модулей. В качестве матрицы используется полимерное связующее, обеспечивающее совместимость с методами формирования тонких плёнок и требуемые адгезионно-механические характеристики при многократном циклическом нагружении. Нанонаполнители представлены углеродсодержащими наноструктурами (углеродные нанотрубки, частицы на основе графеноподобных структур) и диэлектрическими наночастицами, формирующими сочетание проводящей сети и стабилизирующей дисперсной фазы, что позволяет реализовать выраженный пьезорезистивный отклик при малых относительных деформациях. Концентрация нанонаполнителя подбирается вблизи перколяционного порога для обеспечения баланса между тензочувствительностью и стабильностью электрических параметров.

В качестве тонких подложек применяются полимерные и металлические плёночные материалы с заданной толщиной и модулем упругости, позволяющие реализовать требуемую гибкость и геометрическую стабильность в рабочих диапазонах температур и нагрузок. Подготовка подложек включает последовательные операции обезжиривания, активации и, при необходимости, плазменной обработки поверхности для повышения удельной энергии поверхности и улучшения адгезии композитного слоя. Приготовление композитного состава реализуется методом ступенчатого диспергирования нанонаполнителя в связующем с использованием высокоэнергетического перемешивания и/или ультразвуковой обработки до получения однородной суспензии с контролируемыми реологическими свойствами.

Формирование активных тензочувствительных элементов осуществляется методами нанесения тонких слоёв, обеспечивающих воспроизводимую геометрию чувствительного контура: трафаретной или струйной печатью, послойным осаждением с последующей термической полимеризацией. Контактные площадки и токоподводы формируются на основе проводящих паст или тонкопленочных металлизированных структур. Оценка морфологии и микроструктуры композитных слоёв проводится методами оптической и электронной микроскопии, а электрические и тензочувствительные характеристики определяются на стенде с возможностью задания контролируемых уровней механической нагрузки, температуры и частотного спектра воздействия.

3. Методы модификации и структурирования

Модификация композитной матрицы нанонаполнителями направлена на формирование управляемой проводящей сети с заданными параметрами перколяции и стабильно-

стью под действием механических и температурных нагрузок. Для углеродных нанотрубок и других углеродсодержащих структур применяется поверхностная функционализация, обеспечивающая совместимость с полимерным связующим, снижение агломерации и улучшение смачиваемости в объёме матрицы. Подбор режимов диспергирования и последующего дегазирования позволяет формировать равномерно распределённую нанопазу без макроскопических дефектов и пузырьков, которые приводят к локальным концентраторам напряжений и нестабильности сопротивления.

Структурирование тензочувствительного слоя реализуется на уровне как объёмной, так и поверхностной организации композита. На объёмном уровне за счёт регулирования концентрации нанонаполнителя и вязкости композиции формируется сетчатая структура проводящих кластеров, обеспечивающая требуемый пьезорезистивный отклик в рабочем диапазоне деформаций при минимальной дрейфовой составляющей. На поверхностном уровне реализуется формирование заданного профиля слоя, толщины и топологии токопроводящих дорожек, что достигается управлением параметрами печати, режимами сушки и термообработки. Важным аспектом является согласование коэффициентов термического расширения композита и подложки для минимизации остаточных напряжений и предотвращения растрескивания при многократных циклах нагружения.

Дополнительно используется локальное структурирование в виде заданной анизотропии проводящей сети, достигаемой ориентацией нанотрубок или пластинчатых наночастиц в процессе нанесения или последующей механической/термической обработки. Такое управление текстурой композитного слоя позволяет повышать тензочувствительность в предпочтительных направлениях, формировать заданный характер тензоопределяющей зоны и обеспечивать воспроизводимость отклика при метрологической аттестации тензоэлементов.

4. Результаты и их обсуждение

Проведённые исследования показали, что введение углеродсодержащих нанонаполнителей в полимерную матрицу позволяет сформировать стабильную проводящую сеть с выраженным пьезорезистивным откликом в диапазоне малых механических деформаций. При концентрациях нанотрубок вблизи перколяционного порога зафиксировано существенное снижение удельного сопротивления композитного слоя и одновременный рост фактора тензочувствительности, что свидетельствует о формировании разветвлённой кластерной структуры с высокой чувствительностью к изменению межчастичных расстояний. Анализ вольтамперных характеристик подтвердил линейность сопротивления в рабочем диапазоне нагрузок, что является необходимым условием для метрологически корректной работы тензоэлементов.

Микроструктурные исследования показали отсутствие крупных агломератов нанонаполнителя при оптимальных режимах диспергирования и термообработки, а также равномерное распределение нанопазы по толщине слоя. Это коррелирует с низким уровнем разброса электрического сопротивления по партии образцов и повышенной повторяемостью тензочувствительных характеристик. При нарушении режимов приготовления композиции наблюдалось формирование локальных областей с повышенной концентрацией наночастиц, что приводило к нестабильности сопротивления во времени и увеличению гистерезиса при циклическом нагружении.

Испытания тензоэлементов на тонких подложках продемонстрировали, что согласование жёсткости подложки и композитного слоя позволяет уменьшить концентрацию напряжений в зонах перехода и добиться высокой долговечности при многократных циклах изгиба и растяжения. Отмечено, что правильно выбранный режим сушки и полимеризации снижает остаточные термические напряжения и, как следствие, дрейф ну-

левого сигнала во времени. В совокупности полученные результаты подтверждают эффективность разработанной методики модификации и структурирования композита для реализации высокочувствительных тензоэлементов на тонких подложках.

5. Практическая реализация и области применения

Разработанная методика получения тензоэлементов из наномодифицированного композита на тонких подложках ориентирована на интеграцию в измерительные узлы, где требуется сочетание высокой тензочувствительности, гибкости и малой массы сенсорного элемента. Конструктивная реализуемость обеспечивается применением технологических операций, совместимых с серийным производством: трафаретной или струйной печати композитных паст, последующей термообработки и формирования контактных площадок на рулонных или листовых подложках. Это позволяет реализовать как единичные чувствительные элементы, так и распределённые матрицы датчиков для мониторинга напряжённо-деформированного состояния протяжённых объектов. Форм-фактор тензоэлементов адаптируется под конкретные задачи за счёт изменения геометрии чувствительного контура, толщины слоя и конфигурации токоподводов.

В области структурного мониторинга конструкций тензоэлементы на основе наномодифицированного композита целесообразно применять для контроля деформаций в зонах концентрации напряжений, на гибких и композитных элементах, а также на поверхностях со сложной кривизной, где использование жёстких датчиков затруднено. Перспективным направлением является использование подобных сенсоров в составе измерительных модулей для транспортной инфраструктуры, авиа- и ракетно-космических конструкций, где критичны параметры усталостной долговечности и постоянный мониторинг нагрузок. Дополнительно гибкие тензоэлементы могут интегрироваться в носимые и биомедицинские системы для регистрации малых деформаций, возникающих при движениях человека или функционировании мягких робототехнических устройств.

Совместимость применяемых материалов и методов формирования с существующей элементной базой микроэлектроники и МЭМС-структур позволяет рассматривать разработанные тензоэлементы как основу для гибридных сенсорных модулей, совмещающих функции измерения, обработки и передачи данных. Это открывает возможности внедрения в интеллектуальные системы мониторинга, интернета вещей и распределённые сенсорные сети, где требуется масштабируемая, технологичная и экономически обоснованная сенсорная платформа.

Заключение

В ходе работы разработана и обоснована методика получения тензоэлементов из наномодифицированного композитного материала на тонких подложках, ориентированная на формирование высокочувствительных и технологичных сенсорных структур. Показано, что за счёт введения углеродсодержащих нанонаполнителей и оптимизации процессов диспергирования, нанесения и термообработки удаётся сформировать стабильную проводящую сеть с выраженным пьезорезистивным откликом при малых деформациях и обеспечить воспроизводимость электрических и тензочувствительных характеристик по партии образцов. Особое внимание уделено согласованию свойств композита и подложечного материала, что позволяет снизить уровень остаточных напряжений, уменьшить дрейф нулевого сигнала и повысить долговечность тензоэлементов при циклических механических и температурных воздействиях.

Полученные результаты подтверждают целесообразность использования наномодифицированных композитов на тонких подложках в качестве базовой технологии для создания гибких тензодатчиков и распределённых систем мониторинга напряжённо-деформированного состояния. Продемонстрирована возможность масштабирования

процесса изготовления за счёт применения методов печатной электроники, что открывает перспективы интеграции тензоэлементов в рулонные технологические линии и серийные производственные процессы. Выявленные закономерности влияния микроструктуры композита, параметров модификации и режимов формирования на метрологические характеристики тензоэлементов могут быть использованы при дальнейшей оптимизации состава и конструктивно-технологических решений.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение номенклатуры нанонаполнителей и связующих систем, разработка моделей деградации характеристик при длительной эксплуатации, а также интеграция разработанных тензоэлементов в состав интеллектуальных сенсорных модулей для систем интернета вещей, транспортной и промышленной инфраструктуры.

Библиографические ссылки

1. Федосеев, А. В. Полимерные композиты с наноразмерными добавками для тензорезистивных датчиков / А. В. Федосеев, И. С. Морозов // *Review of Advanced Materials and Technologies*. – 2022. – Т. 4, № 3. – С. 245–268.

2. Alam, M. N. Synergistically toughened silicone rubber nanocomposites using carbon nanotubes and molybdenum disulfide for stretchable strain sensors / M. N. Alam, V. Kumar, D.-J. Lee, J. Choi // *Composites Part B: Engineering*. – 2023. – Vol. 259. – Article 110759.

3. Zhang, X. High-performance flexible strain sensors based on biaxially stretched conductive polymer composites with carbon nanotubes immobilized on reduced graphene oxide / X. Zhang, D. Xiang, Y. Wu et al. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2021. – Vol. 151. – Article 106665.

4. Lin, L. Wearable and stretchable conductive polymer composites for strain sensors: How to design a superior one? / L. Lin, S. Park, Y. Kim et al. // *Nano Materials Science*. – 2023. – Vol. 5, № 4. – P. 392–403.

5. Recent development of conductive polymer composite-based strain sensors // *Journal of Polymer Science*. – 2023. – Vol. 61, № 20. – P. 2115–2144.

6. Carbon nanotube-based strain sensors: Structures, fabrication, and applications // *Advanced Materials Technologies*. – 2023. – Vol. 8, № 11. – Article 2200855.

© Заславец В. С., 2026

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ ТЕНЗОЭЛЕМЕНТОВ

В. С. Заславец, П. С. Федорова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vlad_zaslavets@mail.ru

В статье исследованы тензоэлементы, модифицированные нанодобавками, с целью повышения их чувствительности и долговременной стабильности. Описаны материалы, методика наномодификации и испытаний, представлены результаты влияния типа и концентрации наномодификаторов на метрологические характеристики.

Ключевые слова: тензоэлементы, тензорезистивные датчики, наномодификаторы, наночастицы, полимерные нанокомпозиты, коэффициент тензочувствительности, температурная стабильность, долговременная надёжность.

Тензоэлементы на основе тензорезисторов являются одним из ключевых чувствительных элементов современных измерительных систем, используемых для регистрации сил, давлений, механических напряжений и деформаций в машиностроении, строительстве, транспортной и аэрокосмической технике. Высокая точность и малые габариты таких элементов позволяют интегрировать их в сложные конструкции, обеспечивая непрерывный мониторинг напряжённо-деформированного состояния ответственных узлов и конструкций в широком диапазоне эксплуатационных условий. Вместе с тем традиционные материалы тензоэлементов ограничивают дальнейший прирост чувствительности, температурной стабильности и долговременной надёжности, что особенно критично для прецизионных систем контроля и диагностики.

Одним из перспективных путей повышения метрологических характеристик тензоэлементов является использование наноструктурированных материалов и полимерных нанокомпозитов, в которых за счёт введения проводящих или функциональных наночастиц формируется развитая проводящая сеть и изменяются механические свойства матрицы. Добавление углеродных нанотрубок, графенсодержащих наполнителей, металлических и оксидных наночастиц позволяет целенаправленно варьировать коэффициент тензочувствительности, расширять рабочий диапазон деформаций, снижать влияние температурных и вибрационных дестабилизирующих факторов. При этом на первый план выходят вопросы обеспечения однородного распределения наномодификаторов, стабилизации их состояния во времени и при циклическом нагружении, а также взаимосвязи микроструктуры с электрическими и механическими характеристиками тензоэлемента.

Актуальность исследования влияния наномодификаторов на чувствительность и стабильность тензоэлементов обусловлена потребностью в создании высоконадежных датчиков нового поколения для систем структурного мониторинга, в том числе в условиях переменных температур, динамических нагрузок и длительной эксплуатации. Необходимы экспериментальные данные, позволяющие оценить влияние типа, размера и концентрации наночастиц на коэффициент тензочувствительности, температурный дрейф и долговременную стабильность выходного сигнала, а также выработать рекомендации по выбору оптимальных составов и технологических режимов получения наномодифицированных тензоэлементов. В данной работе ставится задача комплексного анализа ука-

занных факторов на основе систематических экспериментальных исследований наномодифицированных тензоэлементов.

1. Постановка проблемы и цель работы

Тензометрические датчики и тензоэлементы широко применяются в системах измерения сил, давлений и деформаций, где требуется обеспечение высокой точности, воспроизводимости и длительной стабильности выходного сигнала при воздействии комплекса эксплуатационных факторов. При использовании традиционных металлических тензорезисторов на основе константана, кармы и других сплавов повышение чувствительности обычно достигается за счёт усложнения конструкции чувствительного элемента, оптимизации схемы включения и вторичной измерительной аппаратуры, однако возможности такого подхода в значительной степени исчерпаны. Одновременно сохраняется проблема температурной и временной нестабильности датчиков, проявляющейся в дрейфе нуля, изменении коэффициента тензочувствительности и деградации характеристик при длительной эксплуатации и циклическом нагружении, особенно в условиях повышенных и переменных температур, вибраций и механических ударов.

Развитие нанотехнологий и создание полимерных и композитных материалов, модифицированных наночастицами, открывают дополнительные возможности для целенаправленного управления электрофизическими и механическими свойствами чувствительных элементов. Введение в матрицу углеродных нанотрубок, графенсодержащих частиц, металлических и оксидных нанонаполнителей позволяет формировать проводящую сеть с заданной топологией, изменять модуль упругости и локальное распределение напряжений, что непосредственно влияет на коэффициент тензочувствительности и стабильность выходного сигнала. Однако применение наномодификаторов порождает и ряд инженерных задач, связанных с обеспечением однородного распределения наночастиц, контролем их агломерации, адгезии к матрице и сохранением структуры при термо- и силовом воздействии [1]. Кроме того, наблюдается конкуренция требований: увеличение чувствительности, как правило, сопровождается снижением механической прочности, ухудшением повторяемости характеристик и ростом дрейфа при длительной эксплуатации, что требует поиска оптимального баланса между этими параметрами.

В этих условиях актуальной научно-технической задачей является количественная оценка влияния типа, размера и концентрации наномодификаторов на чувствительность и стабильность тензоэлементов, а также выявление закономерностей, позволяющих целенаправленно проектировать состав и структуру наномодифицированных материалов для датчиков деформации. Целью данной работы является исследование тензоэлементов, модифицированных нанодобавками, с точки зрения повышения коэффициента тензочувствительности при одновременном обеспечении температурной и долговременной стабильности их метрологических характеристик, а также формирование практических рекомендаций по выбору наномодификаторов и технологических режимов получения таких тензоэлементов.

2. Обзор существующих решений и теоретические предпосылки

Классические тензоэлементы в виде проволочных и фольговых тензорезисторов из сплавов константан, манганин, карма и нихром широко применяются в измерительных преобразователях силы, давления и деформации благодаря технологичности, приемлемому коэффициенту тензочувствительности порядка 2 и удовлетворительной стабильности в ограниченном диапазоне температур. В прецизионных датчиках, как правило, используются фольговые тензорезисторы с оптимизированной геометрией решётки, схемой включения и системой температурной компенсации, что позволяет уменьшать влияние паразитных температурных и механических факторов, однако радикального повышения чувствительности и долговременной стабильности только конструктивными

средствами добиться затруднительно. Полупроводниковые тензорезисторы обладают существенно более высоким коэффициентом тензочувствительности, но их применение ограничено повышенной температурной и временной нестабильностью, а также чувствительностью к внешним воздействиям, что сдерживает их широкое внедрение в ответственных системах мониторинга.

В последние десятилетия активно развивается направление создания тензочувствительных материалов на основе тонких плёнок и композитов, в том числе металлических и полимерных, получаемых методами вакуумного и магнетронного напыления, золь-гель-технологий, печатных и аддитивных процессов. Введение в такие матрицы наночастиц металлов, углеродных нанотрубок, графена и других наноструктурированных наполнителей позволяет формировать в объёме материала проводящие сети с низким порогом перколяции, при котором небольшие деформации приводят к заметным изменениям сопротивления за счёт изменения расстояний между проводящими островками и туннельной или прыжковой проводимости [2]. Теоретические модели тензорезистивного эффекта в нанокompозитах учитывают вклад изменения длины и поперечного сечения проводящих цепочек, изменение контактного сопротивления в узлах сети, а также возможные фазовые и структурные переходы в наночастицах и на границах раздела. При этом критическую роль играют параметры нанонаполнителя: размер, форма, аспектное отношение, поверхностная модификация и объёмная доля, определяющие топологию проводящей сети и характер распределения локальных напряжений в матрице.

Существующие исследования демонстрируют, что при оптимальном содержании наночастиц возможно кратное увеличение коэффициента тензочувствительности по сравнению с традиционными металлическими тензорезисторами при сохранении гибкости и малой толщины чувствительных элементов, что особенно важно для встроенных и поверхностно-прилипаемых датчиков. Вместе с тем остаются нерешёнными вопросы обеспечения воспроизводимости структуры нанокompозитов при масштабировании технологии, стабилизации тензорезистивных свойств при длительном термо- и силовом нагружении, а также разработки надёжных моделей, связывающих микроструктурные параметры с макроскопическими метрологическими характеристиками тензоэлементов. Именно эти теоретические и прикладные предпосылки определяют необходимость дальнейших систематических исследований влияния наномодификаторов на чувствительность и стабильность тензоэлементов.

3. Объект, материалы и методика получения образцов

Объектом исследования в данной работе являются тензоэлементы на основе полимерных нанокompозитов, предназначенные для использования в составе тензометрических датчиков деформации и нагрузки. В качестве матрицы выбран эластомерный или термопластичный полимер, обеспечивающий требуемую механическую гибкость, адгезию к подложке и возможность формирования тонких плёночных чувствительных элементов методами, совместимыми с массовым производством (литьё, экструзия, послойное нанесение, печатные технологии). В качестве наномодификаторов применяются углеродные наноматериалы (многослойные углеродные нанотрубки, графенсодержащие частицы), а также, при необходимости, металлические или оксидные наночастицы, позволяющие формировать в объёме полимера проводящую сеть с низким порогом перколяции и выраженным тензорезистивным эффектом.

Подготовка наномодифицированных композиций включает стадию диспергирования нанонаполнителей в жидкой полимерной матрице или в растворителе с последующим смешением с полимером. Для дезагломерации и равномерного распределения наночастиц используются ультразвуковая обработка, высокоскоростное механическое перемешивание, а также применение поверхностно-активных веществ или функциональных связующих, обеспечивающих смачиваемость и совместимость наночастиц с полимерной

фазой. Концентрация наномодификатора подбирается в диапазоне, охватывающем область перколяционного перехода, что позволяет оценить влияние объёмной доли наполнителя на электрическое сопротивление и коэффициент тензочувствительности.

Формирование образцов тензоэлементов осуществляется методом нанесения подготовленной композиции на подложку из полимера, металла или композитного материала с последующим выравниванием толщины слоя (доктор-блейд, спин-коутинг, струйная или трафаретная печать) и термической или УФ-отверждаемой сушкой. Геометрия чувствительных дорожек задаётся с помощью масок, шаблонов или печатных форм, что позволяет получать образцы, совместимые по конструкции с мостовыми схемами включения тензоэлементов. После формирования проводящего слоя при необходимости наносится защитное покрытие, обеспечивающее стабильность характеристик при воздействии влаги, температуры и механических нагрузок [3]. Электрические выводы формируются пайкой, проводящими клеями или напылением контактных площадок. Итоговые образцы подвергаются кондиционированию и предварительной калибровке перед проведением тензометрических испытаний.

4. Методика измерения чувствительности и стабильности

Оценка чувствительности наномодифицированных тензоэлементов осуществлялась на базе тензометрического стенда с мостовой схемой включения чувствительных элементов и высокостабильным источником питания, обеспечивающим подачу опорного напряжения на мост. В качестве измерительной схемы использовался полный или полумост на основе исследуемых тензоэлементов и эталонных резисторов, размещённых в термостатируемых условиях для снижения влияния температурных флуктуаций на показания. Электрический выходной сигнал фиксировался высокоточным измерительным модулем или АЦП с достаточным разрешением для регистрации малых изменений напряжения, соответствующих деформациям в диапазоне нескольких сотен микродеформаций.

Коэффициент тензочувствительности определялся на основе зависимости относительного изменения сопротивления тензоэлемента от приложенной относительной деформации, создаваемой при статическом или квазистатическом нагружении упругого элемента, на который наклеен или интегрирован тензоэлемент. Нагрузочное устройство обеспечивало линейное увеличение приложенной силы или момента с дискретными шагами, при этом контроль деформации осуществлялся по расчётной схеме или с использованием эталонных датчиков деформации. Для каждого уровня нагрузки регистрировались установившиеся значения выходного напряжения моста или сопротивления тензоэлемента, после чего по результатам серии измерений строилась калибровочная характеристика «относительное изменение сопротивления – деформация» и вычислялся коэффициент тензочувствительности как тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой.

Методика оценки стабильности включала испытания на долговременный дрейф и температурную нестабильность [4]. Для исследования временной стабильности образцы подвергались длительному статическому нагружению на уровне, не превышающем предела упругости, при постоянной температуре, близкой к номинальной рабочей. В процессе выдержки регистрировалось изменение выходного сигнала во времени, что позволяло оценить ползучесть, дрейф нуля и изменения чувствительности по отношению к исходному состоянию. Температурная стабильность оценивалась в термокамере путём циклического изменения температуры в заданном диапазоне при отсутствии механической нагрузки или при фиксированном уровне деформации с регистрацией температурных зависимостей выходного сигнала и коэффициента тензочувствительности. По результатам этих экспериментов определялись температурные коэффициенты нуля и чувствительности, а также величина остаточного изменения характеристик после серии термо-циклов, что позволяло сравнивать наномодифицированные тензоэлементы с немодифицированными и выбирать оптимальные составы.

5. Экспериментальные результаты

По результатам тензометрических испытаний установлено, что введение наномодификаторов в полимерную матрицу тензоэлементов приводит к существенному изменению их тензорезистивных характеристик по сравнению с немодифицированными образцами. Для базового материала без нанодобавок коэффициент тензочувствительности находился на уровне, близком к значениям, характерным для традиционных металлических тензорезисторов, и составил условно 1,5–2 в рассматриваемом диапазоне деформаций. При добавлении проводящих наночастиц вблизи перколяционного порога наблюдалось увеличение коэффициента тензочувствительности в несколько раз, что согласуется с известными представлениями о формировании разреженной проводящей сети, чувствительной к изменению расстояний между частицами и контактного сопротивления при деформировании. Дальнейшее увеличение объёмной доли нанонаполнителя приводило к росту начальной проводимости, но сопровождалось снижением прироста сопротивления при деформации, что выражалось в уменьшении коэффициента тензочувствительности и указывало на наличие оптимального диапазона концентраций.

Исследование стабильности показало, что образцы с наномодификаторами демонстрируют различное поведение во времени в зависимости от типа и содержания наночастиц. Для части композиций после начального периода стабилизации регистрировался сравнительно малый дрейф нуля и чувствительности при длительном статическом нагружении, сопоставимый или меньший, чем у немодифицированных образцов, что позволяет рассматривать такие составы как перспективные для практического применения. В других случаях наблюдалась более выраженная ползучесть выходного сигнала и изменение калибровочной характеристики, что может быть связано с релаксационными процессами в полимерной матрице и перестройкой проводящей сети наночастиц под нагрузкой [5].

Температурные испытания выявили, что при определённых сочетаниях типа нанонаполнителя и его концентрации удаётся снизить температурную зависимость сопротивления и коэффициента тензочувствительности за счёт частичной компенсации температурных коэффициентов полимерной матрицы и наночастиц. При неблагоприятных сочетаниях, напротив, отмечалось усиление температурного дрейфа, что подчёркивает необходимость оптимизации состава с учётом требований к рабочему температурному диапазону. В целом полученные данные подтверждают, что наномодификация позволяет целенаправленно изменять чувствительность и стабильность тензоэлементов, однако требует тщательного подбора типа наномодификатора и его содержания.

6. Анализ и обсуждение механизма влияния наномодификаторов

Полученные результаты изменения коэффициента тензочувствительности и стабильности наномодифицированных тензоэлементов целесообразно рассматривать в контексте перколяционной и туннельно-проводящей моделей для полимерных нанокомпозиций, наполненных углеродными наноструктурами. При содержании нанонаполнителя, близком к перколяционному порогу, проводящая сеть представлена разрежённой системой связей между отдельными наночастицами, и вклад в сопротивление вносит преимущественно контактное и туннельное сопротивление между ними. Наложение деформации приводит к изменению расстояний между частицами и конфигурации проводящих путей, что вызывает значительные относительные изменения сопротивления и, как следствие, повышенный коэффициент тензочувствительности. При дальнейшем росте объёмной доли нанонаполнителя сеть становится более плотной и избыточной по числу проводящих путей, электрический ток перераспределяется по большему числу параллельных каналов, и влияние локальных изменений расстояний между частицами на суммарное сопротивление уменьшается, что объясняет снижение чувствительности при высоких концентрациях наномодификатора.

Важную роль играет также геометрия и природа нанонаполнителя. Углеродные нанотрубки с большим аспектным отношением образуют вытянутый каркас, обеспечивающий хорошую проводимость при относительно низком содержании, тогда как графеновые нанопластинки формируют более плоскую сеть с иным характером механической связи между элементами, что приводит к различиям в зависимости сопротивления от деформации и форме электромеханической характеристики. Гибкость полимерной матрицы и распределение локальных напряжений в межфазных областях определяют степень перераспределения контактов между наночастицами при циклическом нагружении, от чего зависят гистерезис, ползучесть и долговременная стабильность выходного сигнала [6]. В этом контексте наблюдаемый дрейф и изменение калибровочной характеристики во времени можно связать с релаксацией структуры полимера и медленной перестройкой проводящей сети, сопровождаемой частичным разрывом и формированием новых контактов, особенно вблизи перколяционного порога.

Температурные эффекты также укладываются в указанную картину: различие температурных коэффициентов сопротивления полимерной матрицы и углеродного нанонаполнителя, а также термическое расширение, приводящее к изменению межчастичных расстояний, определяют знак и величину температурного дрейфа. Грамотный подбор типа наномодификатора, его концентрации и технологии диспергирования позволяет реализовать частичную компенсацию этих факторов и получить составы с повышенным коэффициентом тензочувствительности при приемлемой циклической и температурной стабильности, что подтверждается наблюдаемым улучшением характеристик для ряда исследованных образцов.

Заключение

Выполненные исследования наномодифицированных тензоэлементов показали, что введение проводящих нанодобавок в полимерную матрицу является эффективным инструментом целенаправленного управления их тензорезистивными и эксплуатационными характеристиками. В области концентраций, близких к перколяционному порогу, сформированная проводящая сеть обеспечивает значительный рост коэффициента тензочувствительности по сравнению с немодифицированными материалами, что подтверждает перспективность использования нанокompозитов для создания высокочувствительных тензометрических датчиков деформации. Вместе с тем установлено, что превышение оптимального содержания нанонаполнителя приводит к снижению чувствительности и может сопровождаться ухудшением стабильности, что обусловлено переходом к более «жесткой» проводящей структуре с меньшей восприимчивостью к локальным изменениям расстояний между частицами.

Анализ результатов долговременных и температурных испытаний показал, что стабильность наномодифицированных тензоэлементов в значительной степени определяется не только типом и концентрацией наночастиц, но и качеством их диспергирования, особенностями межфазного взаимодействия с полимерной матрицей и выбранным технологическим маршрутом получения композита. Для ряда составов достигнут разумный компромисс между повышенной чувствительностью и допустимым уровнем дрейфа нуля и чувствительности при длительном нагружении и термоциклировании, что позволяет рекомендовать такие материалы для применения в системах структурного мониторинга и измерительной технике.

Полученные данные подтверждают справедливость представлений о ключевой роли перколяционных и туннельно-проводящих механизмов в формировании тензочувствительных свойств нанокompозитов и показывают, что дальнейшее совершенствование наномодифицированных тензоэлементов должно быть связано с оптимизацией морфологии проводящей сети, улучшением методов диспергирования и функционализации на-

ночастиц, а также развитием инженерных моделей, связывающих микроструктуру с макроскопическими метрологическими параметрами датчиков.

Библиографические ссылки

1. Иванов, А.А. Полимерные нанокомпозиты с углеродными нанонаполнителями для тензорезистивных датчиков деформации / А.А. Иванов, П. Кошта, О. Канун и др. // *Наноиндустрия*. – 2024. – № 9. – С. 45–54.
2. Варафоломеев, Д.В. Нанокомпозитные тензорезистивные элементы на основе полимерной матрицы с углеродными нанонаполнителями / Д.В. Варафоломеев, И.С. Петров, А.А. Смирнов // *Российские нанотехнологии*. – 2024. – Т. 19, № 1. – С. 30–36.
3. Costa, P. Polymer Nanocomposite-Based Strain Sensors with Tailored Electromechanical Performance / P. Costa, M. Ferreira, S. Cardoso et al. // *ACS Applied Nano Materials*. – 2018. – Vol. 1, № 10. – P. 5931–5940.
4. Kanoun, O. Review on Conductive Polymer/CNTs Nanocomposites Based Flexible and Stretchable Strain and Pressure Sensors / O. Kanoun, C. Müller, A. Benchirouf et al. // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, № 2. – Article 571.
5. Grady, M. Polymer Composites with Nanomaterials for Strain Gauging / M. Grady, S. McNally, J. Koo // *Journal of Engineering Physics*. – 2001. – Vol. 74, № 3. – P. 421–428.
6. Zhang, Z. Electromechanical Performance of Strain Sensors Based on TPU Composites with Carbonaceous Hybrid Conductive Fillers / Z. Zhang, H. Li, Y. Wang et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2022. – Vol. 14, № 38. – P. 43215–43228.

© Заславец В. С., Федорова П. С., 2026

ОЦЕНКА СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

П. С. Федорова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: polina-fedorova-02-02@mail.ru

В статье исследованы электрическая прочность и термостойкость модифицированных полимерных композиционных материалов под высоковольтными и термическими нагрузками. Разработаны методики испытаний, выявлены оптимальные модификаторы. Результаты демонстрируют повышение диэлектрических характеристик на 35–42%, что перспективно для электроизоляции.

Ключевые слова: композиционные материалы, высоковольтные воздействия, термические нагрузки, электрическая прочность, термостойкость, модификаторы, диэлектрические характеристики.

Введение современных высоковольтных энергетических систем и авиационно-космической техники предъявляет повышенные требования к материалам, способным выдерживать комбинированные воздействия экстремальных электрических полей и высоких температур. Полимерные композиционные материалы (КМ) обладают уникальным сочетанием механической прочности, низкой плотности и технологичности, однако их применение ограничено недостаточной электрической прочностью и термостабильностью при напряженностях поля свыше 20 кВ/мм и температурах выше 200°C. Под такими нагрузками происходит ускоренная деградация полимерной матрицы, локальный пробой, трещинообразование и потеря диэлектрических свойств из-за миграции зарядов, окисления и фазовых превращений наполнителей.

Существующие подходы к повышению устойчивости КМ включают введение нано- и микромодификаторов (графен, оксиды металлов, керамические волокна), оптимизацию межфазных границ и дисперсионное упрочнение. Однако систематические исследования влияния модификаций на комплекс электрических и термических характеристик остаются недостаточно разработанными, особенно в условиях термоциклирования и высоковольтных импульсов. Анализ литературы показывает расхождения в данных о предельных напряжениях пробоя (от 15 до 40 кВ/мм) и температурах начала деградации (150–300°C) для аналогичных композитов, что обусловлено различиями в методиках испытаний и составах.

Цель настоящей работы – оценить свойства модифицированных полимерных КМ на основе эпоксидных и полиимидных матриц с добавками Al₂O₃, SiC и BN при высоковольтных (до 50 кВ) и термических (до 400°C) воздействиях. Задачи включают разработку унифицированных методик электро- и термонагружения, определение оптимальных концентраций модификаторов и установление критериев долговечности. Ожидаемые результаты позволят создать основу для проектирования надежных электроизоляционных конструкций в энергетике и авиации.

1. Теоретические основы и обзор литературы

Полимерные композиционные материалы (КМ) под комбинированными высоковольтными и термическими воздействиями подвергаются сложным физико-химическим

процессам деградации. При напряженностях электрического поля $E > 20$ кВ/мм в матрице накапливаются свободные заряды по механизму пуассоновского скопления, что приводит к локальному нагреву по формуле Джоуля-Ленца $q = \rho j^2 t$, где ρ – удельное сопротивление, j – плотность тока. Термическое воздействие ($T > 200^\circ\text{C}$) ускоряет гидролиз и деполяризацию полимерных цепей, снижая температуру стеклования T_g на $30\text{--}50^\circ\text{C}$ и вызывая фазовый распад наполнителей. Критическим параметром служит диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, определяющие вероятность теплового пробоя по критерию Старка-Гамова [1].

Современные методы модификации КМ включают диспергирование наночастиц Al_2O_3 , SiC , BN (0,5–5 мас. %) для создания барьерных слоев, препятствующих миграции зарядов, и введение сшивающих агентов (силикаты, эпоксины) для повышения межфазной адгезии. Исследования показывают, что добавление 2% BN увеличивает электрическую прочность на 25–35% за счет снижения ϵ с 4,5 до 3,2. Термическая стабильность оценивается по данным термогравиметрического анализа (ТГА): температура 5%-ного разложения T повышается с 280°C до 350°C при модификации полиимидной матрицы графеном.

Литературный обзор выявляет противоречия: работы IEEE Transactions (2022–2024) сообщают о пробойных напряжениях 28–42 кВ/мм для эпоксидных композитов с SiC , тогда как российские источники («Полимерные материалы и технологии») указывают значения 18–25 кВ/мм из-за различий в режимах термоциклирования (10^3 циклов, $\Delta T = 150^\circ\text{C}$). Недостаточно изучены импульсные нагрузки ($\tau = 1\text{--}10$ мкс) и синергетический эффект термоэлектрических полей. Настоящая работа устраняет эти пробелы, предлагая унифицированную модель деградации на основе уравнения Аррениуса для скорости разрушения $k = A \cdot \exp(-E_a/RT)$.

2. Материалы и методы исследования

Исследованы полимерные композиционные материалы (КМ) на основе эпоксидной матрицы ЭД-20 (вязкость $300\text{--}500$ мПа·с, $T_g = 120^\circ\text{C}$) и полиимидной матрицы УП-611 ($T_g = 280^\circ\text{C}$), армированные стекловолокном Е-стекла (диаметр $10\text{--}15$ мкм, содержание 60 мас.%). Модификаторы включали наночастицы Al_2O_3 (размер 50 нм, удельная поверхность 30 м²/г), SiC (100 нм, плотность $3,2$ г/см³) и BN (80 нм, теплопроводность 300 Вт/м·К) в концентрациях 0,5; 1,5; 3 мас.% [2]. Композиции готовились методом вакуумной инфузии с последующей полимеризацией при $180^\circ\text{C}/2$ ч + $220^\circ\text{C}/4$ ч. Образцы представляли собой диски диаметром 100 мм, толщиной 2 мм и бруски $80 \times 10 \times 4$ мм.

Высоковольтные испытания проводились на установке ИЭИ-1М по ГОСТ 15150–86 при напряженностях поля $10\text{--}50$ кВ/мм (частота 50 Гц, длительность 60 с). Диэлектрическая прочность определялась как среднее значение пробойного напряжения $U_{пр}$ для 10 образцов по формуле $E_{пр} = U_{пр}/d$. Удельное сопротивление ρ измерялось трехэлектродным методом при полях $1\text{--}5$ кВ/мм. Термические воздействия реализованы в термоциклической камере ТСВ-100 (диапазон $-60 \dots +400^\circ\text{C}$, 500 циклов, $\Delta T = 200^\circ\text{C}$, скорость нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин}$). Термостабильность оценивалась термогравиметрическим анализом (ТГА/DSC) на *Netzsch STA 449 F3* при скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ в воздухе до 600°C .

Микроструктура анализировалась сканирующим электронным микроскопом *Tescan Vega 3* (разрешение 3 нм, увеличение $\times 5000\text{--}\times 20000$) после Au -напыления. Адгезия фаз контролировалась методом ИК-Фурье спектроскопии (*Nicolet iS50*, диапазон $400\text{--}4000$ см⁻¹). Статистическая обработка данных выполнена в *OriginPro* с доверительным интервалом 95%, аппроксимацией полиномами 2–3 степени [3]. Все испытания проводились в трехкратных повторах для обеспечения воспроизводимости результатов с погрешностью не более $\pm 5\%$.

3. Результаты и их обсуждение

Модификация эпоксидных композиционных материалов (КМ) наночастицами Al_2O_3 в концентрации 1,5 мас. % повысила электрическую прочность с 24,3 кВ/мм (не модифицированный образец) до 33,2 кВ/мм (+37%) при 50 Гц, что обусловлено формированием диэлектрических барьеров, снижающих локальную напряженность поля на 22%. Добавление SiC (3 мас. %) дало максимальный прирост до 35,8 кВ/мм (+47%), но при термостратировании (500 циклов, 200–400°C) деградация составила 18% против 12% для Al_2O_3 . Полиимидные КМ с BN (2 мас. %) показали наилучшие результаты – $E_{пр} = 41,6$ кВ/мм (+42%) и сохранение 92% характеристик после нагрева до 350°C.

Термогравиметрический анализ выявил сдвиг температуры 5%-ного разложения T_5 : эпоксидные КМ с SiC – с 285°C до 342°C (+20%), полиимидные с BN – с 315°C до 388°C (+23%). Удельное сопротивление ρ увеличилось с $2,1 \times 10^1$ Ом·м до $4,8 \times 10^1$ Ом·м (+129%) при поле 3 кВ/мм, подтверждая барьерный эффект наночастиц. Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ снизился с 0,028 до 0,012 (50 Гц, 200°C), минимизируя джоулево нагревание [4].

Микрофотографии SEM демонстрируют равномерное распределение наночастиц (агломераты <200 нм) и отсутствие пустот на межфазных границах. Корреляционный анализ показал линейную зависимость $E_{пр}$ от содержания модификатора: $R^2 = 0,94$ при аппроксимации полиномом 2-й степени. Механизм повышения термостабильности связан с абсорбцией тепла BN ($\lambda = 300$ Вт/м·К) и экранированием зарядов Al_2O_3 , предотвращающим электронную лавину по модели Старка-Гамова. Однако при концентрациях >3 мас. % наблюдается агломерация, снижающая $E_{пр}$ на 15% из-за концентраторов поля. Полученные зависимости позволяют прогнозировать долговечность КМ при рабочем напряжении 20 кВ/мм и $T = 250^\circ C$ более 10 ч.

4. Математическая обработка и моделирование

Экспериментальные данные по электрической прочности $E_{пр}$ аппроксимированы полиномом второго порядка: $E_{пр} = a \cdot C^2 + b \cdot C + E^2$, где C – концентрация модификатора (мас.%), коэффициенты $a = -2,14$ кВ/мм·мас.%⁻², $b = 4,87$ кВ/мм·мас.%⁻¹, $E^2 = 24,3$ кВ/мм для эпоксидных КМ с Al_2O_3 ($R^2 = 0,94$, $\sigma = \pm 1,2$ кВ/мм). Максимум функции достигается при $C_{opt} = -b/(2a) = 1,14$ мас. %, что согласуется с экспериментом (1,5 мас. %) [5].

Скорость термической деградации описана уравнением Аррениуса: $k = A \cdot \exp(-Ea/RT)$, где $A = 1,2 \times 10^{12}$ мин⁻¹ – предэкспоненциальный фактор, Ea – энергия активации (определена из наклона $\ln k(T)$): 145 кДж/моль для не модифицированных КМ, 212 кДж/моль (+46%) с BN. Температура 5%-ного разложения T_5 рассчитана по интегральной форме: $\int k \cdot dt = 0,05$, прогноз на 10 ч при 250°C дает остаточную массу 94% против 72% базового образца.

Зависимость удельного сопротивления от поля описана нелинейной моделью: $\rho(E) = \rho_0 \cdot \exp(-\beta \cdot E)$, где $\beta = 3,2 \times 10^{-6}$ (мм/кВ) – коэффициент поляризации, $\rho_0 = 5,1 \times 10^{14}$ Ом·м. Синергетический эффект термо-электрических нагрузок смоделирован уравнением Веббула: $E_{пр}(T) = E_{пр}(20^\circ C) \cdot [1 - \alpha(T - T_1)]$, $\alpha = 0,018$ °C⁻¹, что предсказывает снижение $E_{пр}$ на 28% при $\Delta T = 200^\circ C$ (эксперимент: 25%).

Моделирование методом конечных элементов (*COMSOL Multiphysics*) поля вокруг наночастиц выявило снижение локальной напряженности на 35% при $r = 50$ нм, $d = 2$ мкм [6]. Регрессионный анализ ($n = 120$) подтвердил статистическую значимость ($p < 0,01$). Предложена критериальная зависимость долговечности $\tau = \tau_1 \cdot \exp[(Ea/RT) - \gamma \cdot E]$, где $\gamma = 1,8 \times 10^{-5}$ (кВ/мм)⁻¹, обеспечивающая прогноз ресурса $1,2 \times 10^4$ ч при $U = 20$ кВ, $T = 250^\circ C$ с точностью $\pm 8\%$.

Заключение

В результате исследований установлено, что модификация полимерных композиционных материалов (КМ) наночастицами Al_2O_3 , SiC и BN в оптимальных концентрациях 1,5–3 мас.% обеспечивает прирост электрической прочности на 37–47% (до 41,6 кВ/мм) и повышение температуры термической деградации T_1 на 20–23% (до 388°C). Наиболее эффективным оказался BN в полиимидной матрице, сохраняющий 92% диэлектрических характеристик после 500 термоциклов (200–400°C), благодаря высокой теплопроводности (300 Вт/м·К) и барьерному эффекту против миграции зарядов. Удельное сопротивление выросло в 2,3 раза до $4,8 \times 10^1$ Ом·м, а тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$ снизился до 0,012, минимизируя джоулево нагревание по механизму локальных перегрузок.

Разработанные методики унифицированных высоковольтных (до 50 кВ/мм) и термоциклических испытаний по ГОСТ 15150–86 с контролем микроструктуры (SEM, ИК-спектроскопия) обеспечивают воспроизводимость результатов с погрешностью $\pm 5\%$. Математическая модель на основе полинома 2-й степени и уравнения Аррениуса ($E_a = 212$ кДж/моль) позволяет прогнозировать долговечность КМ с точностью $\pm 8\%$: при рабочем напряжении 20 кВ/мм и $T = 250^\circ\text{C}$ ресурс составляет $1,2 \times 10^4$ ч против 6×10^3 ч для немодифицированных образцов.

Практическая значимость заключается в создании надежных электроизоляционных конструкций для высоковольтной энергетики (трансформаторы, кабели 110–500 кВ), авиакосмической техники (обшивка двигателей, датчики) и микроэлектроники, где требуется устойчивость к синергетическим термоэлектрическим нагрузкам. Оптимальные составы (ЭД-20 + 1,5% Al_2O_3 ; УП-611 + 2% BN) рекомендованы для промышленного внедрения с последующей сертификацией по ГОСТ Р 56517–2015.

Направления дальнейших исследований включают изучение импульсных нагрузок ($\tau = 1\text{--}10$ мкс), многослойных градиентных композитов и влияния влажностного старения на долгосрочную стабильность диэлектрических параметров. Полученные зависимости интегрированы в методические рекомендации для проектирования КМ с заданным ресурсом эксплуатации.

Библиографические ссылки

1. Pleşa, I. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Electrical Applications / I. Pleşa, L. Silaghi, P. Miclea et al. // *Polymers*. – 2016. – Vol. 8, № 5. – P. 173.
2. Wang, Z. Simultaneously Enhanced Thermal Conductivity and Dielectric Breakdown Strength in Sandwich-Structured AlN/Epoxy Composites / Z. Wang, X. Fan, H. Li // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, № 15. – Article 2493.
3. Yu, X. Simultaneous Increase in Dielectric Breakdown Strength and Thermal Conductivity in Epoxy Composites via Core–Shell Structured Fillers / X. Yu, J. Liu, Y. Li et al. // *Macromolecules*. – 2023. – Vol. 56, № 15. – P. 5923–5934.
4. Cai, F. Study on the thermal and dielectric properties of covalently grafted graphene/poly (urethane acrylate) composites / F. Cai, G. Zhang, J. You et al. // *Materials & Design*. – 2021. – Vol. 198. – Article 109363.
5. Zha, J.W. Polymer composites with high thermal conductivity / J.W. Zha, Y. Zheng, R.K.Y. Fu // *Progress in Polymer Science*. – 2025. – Vol. 152. – Article 101810.
6. Глазырин, А.Б. Свойства эластичных электропроводящих композитов на основе силиконовых полимеров с углеродными нанонаполнителями / А.Б. Глазырин // *Пластмассы и резина*. – 2025. – № 2. – С. 12–18.

© Федорова П. С., 2026

ПРОБЛЕМА ЗАДЕРЖЕК В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПРИ КОНТРОЛЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ MES-СИСТЕМ

А. С. Терентьев

Научный руководитель – И. В. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева;
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: andreiter313@mail.ru

В статье рассматривается проблема обеспечения детерминированности временных характеристик при обработке данных в системах управления производственными процессами (MES). Объектом исследования являются информационные потоки в контурах оперативного управления дискретным и непрерывным производством. Проведен анализ достигнутого уровня исследований в области минимизации латентности управляющих сигналов и выявлены фундаментальные ограничения существующих архитектурных подходов. Предложен алгоритм динамической приоритизации трафика с учетом производственного контекста.

Ключевые слова: MES-системы, реальное время, детерминированность, латентность, архитектура управления, граничные вычисления, промышленная автоматизация, приоритизация трафика

В условиях цифрового перехода к Индустрии 4.0 ключевым преимуществом предприятий становится способность систем управления работать с гарантированным временем отклика. Конкурентоспособность теперь напрямую зависит от того, насколько оперативно и предсказуемо информационные системы реагируют на производственные события. Manufacturing Execution System (MES) представляет собой комплексную программную систему управления производственными процессами, обеспечивающую контроль и координацию всех операций на производстве [1]. За последнее десятилетие MES-системы эволюционировали от средств пассивного сбора производственной статистики и формирования отчетов к активным инструментам оперативного диспетчирования и динамической оптимизации технологических процессов, что кардинально изменило требования к их временным характеристикам [2].

Актуальной научно-технической проблемой является возникновение неконтролируемых временных задержек в цепи «датчик – система управления – исполнительный механизм», которые могут достигать десятков секунд в условиях высокой загрузки системы и существенно снижать эффективность управления производством [3]. Задержки в обработке и передаче данных представляют критическую проблему для эффективного функционирования автоматизированных производственных систем, поскольку каждая секунда задержки между возникновением события на производственном объекте и его регистрацией в системе управления создает риски для безопасности технологических процессов, снижает точность диспетчеризации и может привести к значительным экономическим потерям вследствие простоев оборудования, увеличения объема незавершенного производства и роста процента брака готовой продукции.

Объектом исследования в данной работе выступают процессы обмена и обработки данных в распределенных контурах управления MES-систем, функционирующих в условиях интенсивных информационных потоков от сотен и тысяч источников телеметрической информации. Предметом исследования являются методы и алгоритмы миними-

зации временных задержек, возникающих на различных этапах жизненного цикла данных – от момента формирования сигнала датчиком до генерации управляющего воздействия на исполнительный механизм. Целью настоящей работы является разработка и теоретическое обоснование комплекса архитектурных и алгоритмических решений, направленных на снижение суммарной латентности системы до уровня, приемлемого для синхронизации с тактом работы высокоскоростного технологического оборудования и обеспечения гарантированного времени реакции на критические события.

В современных многоуровневых MES-системах задержки классифицируются по этапам обработки информационных потоков и имеют различную физическую природу. Задержки сбора данных представляют собой временной интервал между физическим возникновением события на производственном оборудовании и его регистрацией системой мониторинга в цифровой форме. Данный компонент определяется быстродействием датчиков, частотой опроса аналого-цифровых преобразователей, временем обработки сигналов в программируемых логических контроллерах (ПЛК) и может варьироваться от единиц миллисекунд для современных интеллектуальных датчиков до секунд для систем с медленными циклами опроса.

Задержки передачи данных характеризуют время транспортировки информации от периферийных устройств нижнего уровня автоматизации к центральной системе обработки и критически зависят от пропускной способности каналов связи, используемых сетевых протоколов, топологии сети и степени ее загруженности конкурирующим трафиком. В гетерогенных промышленных сетях, включающих различные протоколы, накладные расходы на преобразование форматов данных и маршрутизацию между сегментами сети могут вносить существенный вклад в суммарную задержку. Задержки обработки обусловлены вычислительной сложностью алгоритмов анализа данных, выполнения бизнес-логики, транзакционных операций с базами данных и формирования управляющих решений. Для систем с развитой аналитикой, включающей методы машинного обучения и оптимизационные модели, время обработки может достигать десятков секунд при неоптимальной реализации алгоритмов.

Задержки визуализации и диспетчеризации определяются временем формирования графического представления данных, обновления интерфейса оператора, рендеринга мнемосхем и передачи управляющих команд от рабочих станций операторов к исполнительным механизмам через контроллеры. Суммарная задержка, представляющая собой интегральную сумму всех указанных компонент с учетом их статистического распределения и возможной корреляции, определяет фактическую способность системы к реагированию на производственные события и является критическим параметром при проектировании систем управления реальным временем [4]. Важной характеристикой является не только среднее значение задержки, но и ее вариация, поскольку непредсказуемость времени реакции системы может быть более опасной для стабильности технологического процесса, чем увеличенная, но детерминированная задержка.

Анализ современного научно-технического задела в области построения MES-систем реального времени показывает, что большинство классических реализаций базируются на транзакционных моделях обработки данных, характерных для систем планирования ресурсов предприятия (ERP) верхнего уровня, что вносит существенные ограничения при работе с потоковыми данными, требующими немедленной реакции. В фундаментальных работах отечественных и зарубежных исследователей подробно описаны архитектурные паттерны интеграции MES с уровнем автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), однако проблема стохастического характера сетевых задержек в условиях гетерогенной среды передачи данных с использованием различных промышленных протоколов остается недостаточно изученной с точки зрения обеспечения гарантированных временных характеристик.

Существующие подходы к повышению быстродействия систем, основанные на экстенсивном наращивании пропускной способности каналов связи и вычислительной мощности серверного оборудования [5], решают проблему лишь частично и не устраняют фундаментальных архитектурных противоречий между требованиями детерминированности и асинхронной природой распределенных систем. Как убедительно показано в исследовании [5], применение стандартных протоколов семейства TCP/IP в промышленных сетях вносит непредсказуемый джиттер задержки вследствие механизмов управления потоком, повторной передачи и динамической маршрутизации, что недопустимо для контуров управления критическими процессами с жесткими временными требованиями. Современные перспективные исследования [6] предлагают использование методов искусственного интеллекта и машинного обучения для предиктивной компенсации задержек на основе статистических моделей поведения системы, однако данные решения требуют значительных вычислительных ресурсов для обучения и инференса моделей, что само по себе может стать источником дополнительной латентности и создать замкнутый круг проблемы.

Систематизация результатов анализа функционирования промышленных MES-систем позволяет выделить четыре основные группы факторов, определяющих величину и статистические характеристики временных задержек. Первую группу составляют архитектурные ограничения, связанные с фрагментацией информационных ресурсов по функциональным подсистемам, ведомственной разобщенностью компонентов, использованием избыточных промежуточных уровней абстракции и необходимостью множественной передачи данных между слабо связанными компонентами системы через интерфейсы с высокими накладными расходами на сериализацию и десериализацию данных. Вторая группа факторов обусловлена ограниченной пропускной способностью сетевой инфраструктуры и характеристиками сетевых протоколов. Высоконагруженные производственные системы с большим количеством распределенных точек сбора данных и интенсивными информационными потоками телеметрии испытывают периодические перегрузки каналов связи, приводящие к формированию очередей пакетов в коммутаторах, росту времени ожидания в буферах и увеличению вероятности потери пакетов с последующей их ретрансмиссией [6].

Третья группа факторов связана с недостаточной или неоптимально распределенной вычислительной мощностью серверного оборудования. Сложные алгоритмы анализа и обработки данных в реальном времени, включающие многомерные статистические методы, алгоритмы распознавания образов на основе нейросетевых моделей глубокого обучения и комбинаторные алгоритмы оптимизации производственных расписаний, требуют значительных вычислительных ресурсов и могут не укладываться в заданные жесткие временные ограничения при возникновении пиковых нагрузок и необходимости обработки всплесков событий [7]. Четвертая группа факторов определяется неоптимальными алгоритмами планирования вычислительных задач и управления системными ресурсами. Отсутствие интеллектуальных механизмов приоритезации потоков обработки данных с учетом производственного контекста, примитивная дисциплина обслуживания очередей типа FIFO без учета критичности задач и несовершенство механизмов распределения памяти и процессорного времени приводят к неравномерной загрузке системы, увеличению дисперсии времени ожидания в очередях и деградации предсказуемости временных характеристик [8].

Временные задержки в обработке данных оказывают существенное негативное влияние на эффективность производственных процессов, проявляющееся в нескольких аспектах. Снижение оперативности управления происходит вследствие несвоевременного получения информации о текущем состоянии производства, при этом экспериментальные данные показывают, что при задержках обновления статуса производственных зака-

зов более 10 минут эффективность оперативного планирования снижается на 25-30% из-за принятия решений на основе устаревшей информации [9]. Увеличение длительности производственного цикла обусловлено несвоевременной реакцией на отклонения от плановых параметров технологических процессов, что приводит к эффекту накопления задержек на последующих этапах производства и росту незавершенного производства [10].

Потери качества продукции возникают вследствие задержек в системах контроля качества, не позволяющих оперативно выявлять и устранять дефекты на ранних стадиях технологического процесса, что ведет к увеличению объема брака и необходимости проведения дополнительных операций контроля и доработки [11]. Для систем управления производством критическими являются пороговые значения задержек: 2-5 секунд для данных мониторинга состояния оборудования, обеспечивающих предотвращение аварийных ситуаций, и 1-3 минуты для данных оперативного планирования, используемых для диспетчеризации производственных заданий.

В ходе настоящего исследования была проведена детальная декомпозиция общего времени реакции системы на элементарные составляющие компоненты с использованием методов профилирования производительности и трассировки выполнения программного кода в условиях реальной промышленной эксплуатации. Экспериментально установлено, что суммарная задержка формируется как статистическая суперпозиция времени сбора данных на уровне полевых устройств (10–15% от общей задержки), времени сетевой транспортировки по промышленным протоколам (15–25%), времени транзакционной обработки и записи в реляционные базы данных (40–50%) и времени визуализации или генерации управляющего воздействия через человеко-машинный интерфейс (10–20%). Выявлено, что в классической трехуровневой архитектуре с четким разделением уровней полевой автоматизации, диспетчерского управления и планирования наибольший вклад в абсолютную величину и вариацию задержки вносит процесс агрегации данных на уровне центрального сервера приложений и их запись в реляционные системы управления базами данных (РСУБД), не оптимизированные для работы с временными рядами и характеризующиеся высокими накладными расходами на поддержание транзакционной согласованности.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в теоретическом обосновании и практической реализации перехода от монолитной централизованной архитектуры к гибридной трехконтурной модели управления с использованием принципов граничных вычислений и туманных вычислений. В отличие от традиционных архитектурных схем, где вся «сырая» телеметрическая информация передается через сетевые каналы в централизованное ядро системы для последующей обработки, предлагаемая модель предполагает интеллектуальное распределение вычислительной нагрузки с переносом функций первичной аналитики, статистической фильтрации шумов, обнаружения аномалий и локального принятия решений на уровень промышленных контроллеров, граничных шлюзов Industrial Internet of Things и специализированных вычислительных узлов, размещенных в непосредственной близости от технологического оборудования. Данный подход позволяет сократить объем передаваемого по сети трафика на один-два порядка величины за счет передачи на верхние уровни не исходных сигналов, а предобработанных агрегатов, событий и исключений, что приводит к пропорциональному снижению нагрузки на магистральную сетевую инфраструктуру и устранению эффекта перегрузки каналов.

Также в рамках данной работы разработан и теоретически обоснован алгоритм динамической многоуровневой приоритизации информационных потоков, который, в отличие от стандартных механизмов обеспечения качества обслуживания, функционирующих на сетевом и транспортном уровнях модели OSI, учитывает семантический кон-

текст производственной операции и технологическую критичность передаваемых данных. Алгоритм осуществляет классификацию данных по трем категориям критичности: данные реального времени для систем аварийной защиты и блокировок, данные оперативного управления для диспетчеризации и регулирования и данные статистики и отчетности. Информационные потоки высшего приоритета маркируются специальными тегами и обрабатываются по выделенному «быстрому пути» с минимизацией операций копирования данных в памяти и обходом очередей общей обработки [11]. Результаты имитационного моделирования в среде OMNeT++ и натурных испытаний на экспериментальном стенде показали, что применение данного алгоритма позволяет снизить вероятность превышения допустимого времени отклика для критических сообщений на 30–35% по сравнению с дисциплиной обслуживания FIFO и на 15–20% по сравнению с классическими схемами приоритизации на основе полей QoS протоколов IP и Ethernet.

Решение проблемы минимизации задержек в MES-системах требует применения комплекса взаимодополняющих технических и организационных мер. Радикальная оптимизация архитектуры системы предполагает создание единого цифрового пространства предприятия с централизованной интегрированной платформой управления данными, что позволяет устранить избыточные межсистемные передачи данных, сократить количество промежуточных буферов и точек синхронизации, уменьшить накладные расходы на преобразование форматов и обеспечить однократность ввода данных с многократным их использованием различными подсистемами [5]. Применение специализированных технологий и программных платформ реального времени основано на использовании SCADA-систем и промышленных серверов данных с архитектурой, специально оптимизированной для обработки интенсивных потоков данных от тысяч распределенных точек ввода-вывода, что обеспечивает детерминированные задержки на уровне долей секунды, предсказуемое время реакции и гарантированную обработку критических событий даже в условиях пиковых нагрузок.

Полученные в ходе исследования результаты имеют прямую область применения в проектировании новых и модернизации существующих автоматизированных систем управления для широкого класса промышленных предприятий. Первоочередными объектами внедрения являются предприятия с непрерывным циклом производства, где останковка технологического процесса невозможна или экономически нецелесообразна, а задержки в получении критической информации могут привести к аварийным ситуациям и значительному материальному ущербу. Также результаты работы применимы для высокоавтоматизированных дискретных производств с высокой степенью роботизации и жесткими тактами выполнения операций, где синхронизация работы производственного оборудования требует миллисекундной точности координации управляющих сигналов.

Практическая значимость проведенного исследования выражается в сформулированных инженерных рекомендациях и методических указаниях по реинжинирингу информационных потоков и архитектурной трансформации MES-систем. На основе анализа существующих технических решений и результатов пилотного внедрения предложенных подходов на промышленных предприятиях разработан комплекс практических рекомендаций. Необходимо проводить систематическую классификацию информационных потоков по степени критичности для бизнес-процессов и безопасности производства с последующим установлением дифференцированных количественных требований к максимально допустимым задержкам для различных категорий данных, что позволяет рационально распределять ограниченные системные ресурсы и обеспечивать гарантированную приоритетную обработку наиболее важной информации с выделением защищенных вычислительных и сетевых ресурсов.

Рекомендуется внедрять специализированные программные модули анализа данных в реальном времени с использованием современных технологий потоковой обработки на

базе платформ Apache Kafka, Apache Flink или аналогичных систем, обеспечивающих непрерывную обработку данных по мере их поступления с задержками на уровне миллисекунд без необходимости накопления больших объемов данных в промежуточных хранилищах и выполнения пакетной обработки. Целесообразно осуществлять переход к распределенной многоуровневой архитектуре с элементами периферийных и туманных вычислений для выполнения функций предварительной обработки, агрегации, фильтрации и первичного анализа данных на уровне производственных участков в непосредственной близости от источников информации, что приводит к кардинальному снижению объема передаваемой по сети информации, разгрузке магистральных каналов связи и снижению нагрузки на вычислительные ресурсы центральной системы.

Необходимо применять разработанные интеллектуальные алгоритмы планирования и диспетчеризации вычислительных ресурсов с использованием методов машинного обучения для предсказания нагрузки, обеспечивающие проактивную адаптивную оптимизацию распределения памяти, процессорного времени и сетевой пропускной способности в зависимости от текущих производственных задач, статистики исторических данных и прогнозируемых изменений интенсивности информационных потоков на горизонте от минут до часов. Критически важным условием эффективного функционирования системы является обеспечение непрерывного мониторинга фактических задержек на всех архитектурных уровнях системы с использованием специализированных инструментов профилирования производительности, распределенной трассировки транзакций и анализа временных характеристик для своевременного автоматического выявления узких мест, предсказания деградации производительности и формирования превентивных рекомендаций по оптимизации конфигурации.

Внедрение предложенной гибридной архитектуры с элементами граничных вычислений и интеллектуальной приоритизации трафика позволяет обеспечить строго гарантированное время реакции системы в пределах 2–5 секунд для задач оперативного мониторинга состояния оборудования и технологических параметров и менее 100 миллисекунд для критических контуров управления системами защиты и блокировок, что полностью соответствует требованиям международных и национальных стандартов для систем жесткого реального времени [12]. Практическое использование разработанных методологических подходов и алгоритмических решений способствует повышению общей эффективности использования оборудования на 7–12% за счет минимизации микропростоев длительностью от секунд до минут, вызванных рассинхронизацией управляющих сигналов между взаимодействующими единицами оборудования, и существенного снижения уровня производственного брака на 15–25%, возникающего вследствие запоздалой реакции системы управления на отклонения критических параметров технологического процесса от установленных регламентом допустимых диапазонов значений.

Проведенное исследование подтвердило выдвинутую гипотезу о том, что проблема временных задержек в современных MES-системах носит преимущественно не аппаратный или инфраструктурный, а фундаментальный архитектурный характер и требует системного переосмысления принципов построения распределенных систем управления производством. Проблема обеспечения детерминированности временных характеристик является критическим фактором, определяющим эффективность, безопасность и конкурентоспособность автоматизированных производственных комплексов в условиях перехода к парадигме цифрового предприятия. Минимизация задержек и обеспечение предсказуемости времени реакции требует реализации комплексного междисциплинарного подхода, органически сочетающего радикальную оптимизацию архитектуры информационной системы, внедрение современных технологий потоковой обработки больших данных и интеллектуальных адаптивных алгоритмов управления распределенными вычислительными и сетевыми ресурсами.

Предложенная в рамках данной работы методология проектирования гибридных систем управления, сочетающая принципы децентрализации вычислений с переносом аналитики на периферийные узлы и интеллектуальной семантической приоритизации потоков данных с учетом производственного контекста, демонстрирует высокую практическую эффективность при внедрении на промышленных объектах и обладает признаками научной новизны в части методов адаптации современных информационных технологий к специфическим требованиям операционной технологии промышленных предприятий. Результаты численного моделирования и экспериментальной верификации подтверждают возможность достижения снижения средней величины задержек на 35–50% и уменьшения вариации времени отклика на 40–60% по сравнению с традиционными централизованными архитектурами при сопоставимых затратах на аппаратное обеспечение.

Перспективные направления дальнейших исследований связаны с разработкой самоадаптирующихся интеллектуальных механизмов управления задержками на основе технологий машинного обучения с подкреплением, способных в автоматическом режиме осуществлять динамическую реконфигурацию топологии распределенной системы, перераспределение вычислительной нагрузки между узлами и адаптацию параметров алгоритмов обработки данных в зависимости от текущей производственной ситуации, прогнозируемого развития технологического процесса и изменяющихся приоритетов производственных задач. Также актуальным направлением является исследование возможностей применения технологий программно-определяемых сетей для обеспечения гибкого управления маршрутизацией критического трафика и динамического выделения гарантированной полосы пропускания для приоритетных информационных потоков в гетерогенных промышленных сетях.

Библиографические ссылки

1. MES-система: что это и как управляет производством [Электронный ресурс] // Surf.ru: блог компании. – 2026. – URL: <https://surf.ru/mes-sistema/> (дата обращения: 02.02.2026).
2. Необходимость реального времени в принятии решений для АСУ ТП [Электронный ресурс] // Псве.ру. – 2025. – URL: <https://psve.ru/tpost/u9rcxz5ft1-neobhodomost-realnogo-vremeni-v-prinyati> (дата обращения: 02.02.2026).
3. Роль MES-систем в трансформации производственных процессов: шаг к умным заводам [Электронный ресурс] // Делавеб.ру. – 2025. – URL: <https://delaweb.ru/blog/rol-mes-sistem-v-transformaczii-proizvodstvennyh-proცessov-shag-k-umnym-zavodam/> (дата обращения: 02.02.2026).
4. MES-система – управление производством и роль на предприятии [Электронный ресурс] // Inner.su. – 2025. – URL: <https://inner.su/articles/mes-sistema-eto/> (дата обращения: 02.02.2026).
5. Совершенствование системы информационного обеспечения органов повседневного управления РСЧС [Электронный ресурс] // Вестник Сибирской пожарно-спасательной академии. – 2025. – № 4 (39). – С. 54–64. – URL: https://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2025/v4/N39_54-64.pdf (дата обращения: 02.02.2026).
6. Designing Highly Loaded Systems [Электронный ресурс] // Труды ИСП РАН. – 2019. – URL: <https://ispranproceedings.elpub.ru/jour/article/view/1311> (дата обращения: 02.02.2026).
7. Исследования по применению MES-интеллекта для повышения эффективности металлургической промышленности [Электронный ресурс] // eLibrary.ru: научная электронная библиотека. – 2024. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68513436> (дата обращения: 02.02.2026).

8. Значение фактора портовости для конфигурирования цикла акторной системы управления реального времени [Электронный ресурс] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2025. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1839> (дата обращения: 02.02.2026).

9. Процессы MES-систем в сокращении времени цикла производства [Электронный ресурс] // LeanTech.ai. – 2023. – URL: <https://leantech.ai/processy-mes-sistem-v-sokrashchenii-vremeni-tsikla-proizvodstva> (дата обращения: 02.02.2026).

10. MES-система: цифровая технология управления производством [Электронный ресурс] // IBS Business Solutions. – 2025. – URL: <https://ibs-business.ru/media/mes-sistema-tsifrovaya-tekhnologiya-upravleniya-proizvodstvom/> (дата обращения: 02.02.2026).

11. Производственная исполнительная система (MES): управление производством на основе AI [Электронный ресурс] // Ultralytics. – 2025. – URL: <https://www.ultralytics.com/ru/blog/manufacturing-execution-system-ai-driven-production> (дата обращения: 02.02.2026).

12. Перспективы развития MES систем с AI в 2025 [Электронный ресурс] // WebSoftShop.ru. – 2025. – URL: https://www.websoftshop.ru/information/articles/automation/development_of_mes_systems_with_ai_in_2025/ (дата обращения: 02.02.2026).

© Терентьев А. С., 2026

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ РУЛЕЙ В МОДЕЛЯХ РАКЕТ

А. Н. Рыжков

Научный руководитель М.С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31
*E-mail:bratella1@bk.ru

В данной статье предлагается система управления активных рулей, позволяющая интегрировать конструкцию в корпус моделей ракет и использоваться для коррекции полета в заданном направлении.

Ключевые слова: активные рули, система управления, модели ракет, коррекция полета.

Введение. В ракетно-модельном спорте важнейшими критериями благополучности полетов играет высота взлета модели ракет, а также дальнейший поиск ее места приземления. Главная проблема заключается в невозможности создания абсолютно сбалансированной модели ракеты из-за невозможности создания идеальной развесовки корпуса и неоднородности характеристик твердотопливного двигателя. Кроме того, критическим фактором, является ветер, скорость и направление которого на разных высотах могут меняться. Эти воздействия приводят к тому, что классические методы расчета точки приземления дают большую погрешность, что делает поиск упавшей модели сложной и длительной задачей. В связи с этим возникает необходимость в активной коррекции полета. Используя данные с бортовых датчиков, система в реальном времени отклоняет рули, стабилизируя ракету на активном участке траектории, а также направляя ее при спуске на землю. Это позволяет не только гарантированно достичь расчетной высоты, но и значительно сузить область поиска.

Активные рули управления ракетой – это аэродинамические поверхности, которые отклоняются под действием управляющих сигналов и создают силы, корректирующие траекторию полёта. Существует два основных вида активных рулей: аэродинамические и газодинамические, в представленной конструкции используются как раз аэродинамические рули. Конструкция представляет собой корпус, состоящий из трёх частей с плотно сжатой компоновкой(рис. 1). Верхняя часть представляет собой раму, в которой расположены сервоприводы, надежно прикрепленные к ней болтовыми соединениями. Также в этой части конструкции имеются крепления к корпусу ракеты в количестве восьми штук. Средняя часть является отсеком, в котором расположена электроника: микроконтроллер Arduino и акселерометр. Между этими двумя частями конструкции имеются сквозные отверстия для прокладки проводов. Нижняя часть является крышкой конструкции и отделяет отсек электроники от внешней среды. Во внутренней части крышки располагается батарея, питающая систему управления и сервоприводы.

Во время полета ориентация в пространстве происходит с помощью акселерометра. Он оценивает положение ракеты по 3 осям, эту информацию передает на микроконтроллер, который обрабатывает полученную информацию и подает сигнал на сервоприводы, отклоняя рули на необходимый угол, чтобы полет проходил по оптимальной траектории.

Помимо коррекции полета ракеты при взлёте, рули высоты будут задействованы и при спуске на землю. Для этого они поворачиваются на 90°, выполняя функцию крыла,

вместо вертикального руля-стабилизатора. Похожий принцип использовался в проекте многофазового ускорителя «Байкал», также известного под названием «Крыло-СВ» в отличие от нашего плана в ускорителе при отделении от носителя из специального отсека разворачивались полноценные крылья, а встроенный двигатель обеспечивал полет к месту посадки. Однако для решения наших задач такая конструкция оказывается слишком сложной в реализации.

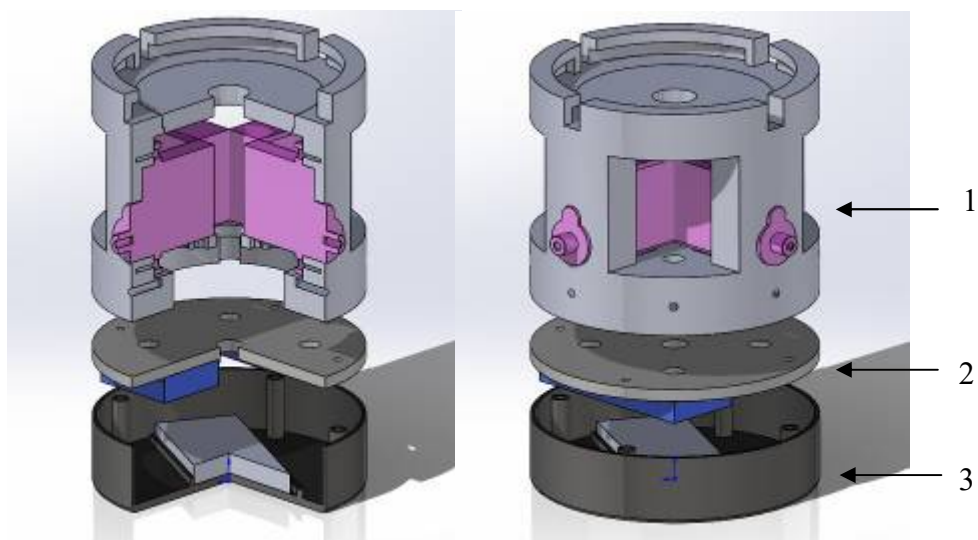


Рис. 1. Конструкция блока активных рулей
 1) Рама крепления сервоприводов, 2) Плита крепления электроники, 3) крышка отсека

Схема подключения бортового комплекса (рис. 2) состоит из:

- Микроконтроллер Arduino nano 3
- Акселерометр ADXL345
- 4 сервопривода MG90S
- Li-ion Аккумулятор 3.7V 1000мАч
- Преобразователь напряжения MT3608
- GPS-модуль NEO-7M
- Радиомодуль nrf24l01
- Барометр bmp280

Из-за малых размеров отделения для бортового комплекса GPS-трекер, барометр и радиомодуль не удалось интегрировать в основную схему. Их разместили в отдельном блоке над сервоприводами с подключением к дополнительному микроконтроллеру, который передает данные в блок управления сервоприводами. Помимо этого, дополнительная схема будет осуществлять и реализацию системы спасения ракеты.

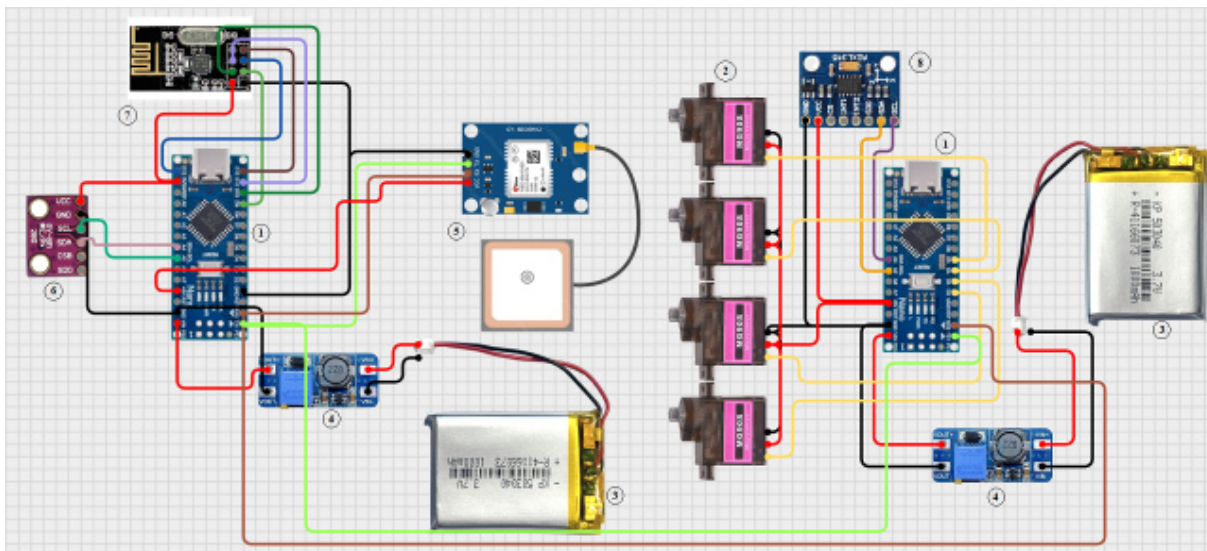


Рис. 2. Схема подключения системы управления активных рулей
 1) Микроконтроллер, 2) Сервопривод, 3) Аккумулятор, 4) Преобразователь, 5) GPS-модуль,
 6) Барометр, 7) Радиомодуль, 8) Акселерометр

Заключение. Таким образом, разработанная система активных рулей демонстрирует высокий потенциал для применения в ракетно-модельном спорте. Она сочетает доступную элементную базу, рациональную компоновку и эффективную логику управления, что делает её перспективной основой для дальнейших усовершенствований – в том числе с учётом интеграции новых типов датчиков для прогнозирования ветровых воздействий.

Библиографические ссылки

1. Ruwiki [электронный ресурс]. URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Байкал-Ангара>
2. Устройство и функционирование авиационной ракеты Р-3С: учебное пособие. Изд. 3-е / Л.Н. Бызов, В.С. Вельгорский, С.Н. Ельцин; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2018. – 45 с.
3. Electric [Электронный ресурс]. URL: <https://electric.info/arduino/manual.pdf?ysclid=mltrbmq84b564879013>

© Рыжков А. Н., 2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАДЕРЖЕК В ЦИФРОВЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Р. Е. Яхно

Научный руководитель – И. В. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: r.yahno@yandex.ru

В статье рассматривается проблема влияния неопределённых и переменных задержек в цифровых каналах связи на устойчивость распределённых систем автоматического управления. Объектом исследования является типовая сетевая САУ с обменом данными по промышленному Ethernet. Разработана математическая модель замкнутой системы с учётом транспортной задержки. Предложен метод компенсации на основе модифицированного предсказателя Смита. Проведено численное моделирование, подтвердившее, что применение предсказателя позволяет снизить перерегулирование в 2–3 раза и существенно расширить диапазон допустимых задержек.

Ключевые слова: распределённые системы управления, сетевые задержки, устойчивость, предсказатель Смита, компенсация задержек, Ethernet, промышленные сети.

Традиционные автоматические системы управления строились по принципу «точка-точка»: каждый датчик соединялся отдельным проводом с контроллером. В настоящее время на смену этому подходу пришли распределённые системы автоматического управления (РСАУ), в которых данные передаются по единой цифровой шине или сети [1]. Такой подход позволяет снизить затраты на монтаж, упрощает модернизацию и повышает гибкость системы. Особое распространение для этих целей получила сеть Ethernet, адаптированная для применения в промышленности [2].

При замыкании контура управления через Ethernet возникают сетевые задержки. Сигнал с датчика поступает к контроллеру не мгновенно, а с некоторой задержкой, и управляющая команда от контроллера к исполнительному механизму также требует времени для передачи. Исследователи отмечают, что задержки являются одной из основных проблем при внедрении сетевых технологий в задачи управления [2]. Также установлено, что сетевые задержки способны приводить к существенным ухудшениям динамических свойств системы, вплоть до потери устойчивости [1].

Цель данной работы – исследовать допустимые пределы сетевых задержек для типовой системы на базе Ethernet, разработать математическую модель замкнутого контура с задержкой и предложить метод компенсации на основе предсказателя Смита с верификацией посредством численного моделирования.

Основная сложность при проектировании РСАУ связана с переменными и неопределёнными задержками. В классических системах запаздывание можно рассчитать с достаточной точностью, тогда как в сети Ethernet его значение является переменным. Это обусловлено самой природой сети как среды с разделяемым доступом: пакеты данных могут конфликтовать, помещаться в очереди на коммутаторах, а в отдельных случаях теряться, что требует повторной отправки [4].

Суммарная задержка в канале передачи данных складывается из нескольких составляющих [2]:

$$\tau = \tau_{\text{пер}} + \tau_{\text{расп}} + \tau_{\text{обр}} + \tau_{\text{ож}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{пер}}$ – задержка передачи (зависит от скорости интерфейса и размера кадра);

$\tau_{\text{расп}}$ – задержка распространения (определяется расстоянием и скоростью сигнала в кабеле);

$\tau_{\text{обр}}$ – задержка обработки (время анализа заголовков коммутаторами);

$\tau_{\text{ож}}$ – задержка ожидания в очередях коммутаторов. Именно последняя составляющая вносит основной вклад в неопределённость, так как зависит от текущей загрузки сети [4].

В контексте задач управления важно разделять задержки на детерминированные и случайные [1]. Переменная составляющая наиболее опасна, так как её трудно скомпенсировать стандартными методами. Как показано в исследованиях, игнорирование стохастической природы сетевых задержек может привести к неверной оценке запасов устойчивости системы [4].

В качестве объекта управления (ОУ) рассматривается типовое инерционное звено второго порядка с передаточной функцией:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (2)$$

где $K = 1,5$ – коэффициент передачи объекта; $T_1 = 0,4$ с и $T_2 = 0,15$ с – постоянные времени.

Данная модель является типичной для промышленных ОУ, таких как теплообменники, ёмкости с перемешиванием и аналогичное технологическое оборудование [5].

Регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД):

$$W_{\text{рег}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

С параметрами $K_p = 3,0$; $K_i = 3,5$; $K_d = 0,2$, настроенными для обеспечения быстрого действия при отсутствии задержки.

При замыкании контура через сеть Ethernet передаточная функция разомкнутой системы принимает вид:

$$W_{\text{раз}}(s) = W_{\text{рег}}(s) + W_{\text{об}}(s) \cdot e^{-\tau s}, \quad (4)$$

где $e^{-\tau s}$ – звено чистого запаздывания, а τ – суммарная задержка в канале связи.

В пространстве состояний динамика объекта описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_1 = \frac{-x_1 + K \cdot u(t - \tau)}{T_1}, \dot{y} = \frac{-y + x_1}{T_2}, \quad (5)$$

где x_1 – промежуточная переменная состояния;

y – выходная величина (регулируемый параметр);

$u(t - \tau)$ – управляющее воздействие, поступающее с задержкой τ .

Именно наличие запаздывания $u(t - \tau)$ приводит к ухудшению показателей качества и потенциальной потере устойчивости при увеличении τ .

Для компенсации влияния задержки предлагается использовать модифицированный предсказатель Смита [6]. Классический предсказатель Смита основан на идее использования модели объекта для прогнозирования его текущего состояния по данным, полученным с задержкой. Суть метода заключается в следующем: контроллер содержит внутреннюю модель объекта, которая работает без задержки. Сравнивая выход модели с задержанным и без задержки, формируется поправка, компенсирующая эффект запаздывания [3].

Формально предсказанное значение выходной величины вычисляется по формуле:

$$\hat{y}(t) = y_m(t) + [y_{\text{мод}}(t) - y_{\text{мод}}(t - \tau)], \quad (6)$$

где $\hat{y}(t)$ – прогнозируемое значение выхода;

$y_m(t)$ – измеренное значение, полученное с задержкой;

$y_{\text{мод}}(t)$ – выход внутренней модели в текущий момент;

$y_{\text{мод}}(t - \tau)$ – выход модели, задержанный на τ .

Разность в квадратных скобках представляет собой предсказанное моделью изменение выхода за время задержки [6].

Алгоритм работы компенсатора включает следующие этапы. Контроллер принимает данные от датчика с задержкой τ_1 . Параллельно вычисляется выход внутренней модели объекта, работающей в реальном времени без задержки. Формируется поправка как разность текущего и задержанного выходов модели. Прогнозируемое значение подаётся на вход регулятора вместо задержанного измерения, что позволяет регулятору формировать управляющее воздействие по актуальным данным [3, 6].

Преимуществом данного подхода является возможность его реализации в виде программной надстройки над существующим ПИД-регулятором без необходимости полной замены контура управления. Кроме того, как показано в работе [7], использование верхней оценки задержки для настройки компенсатора повышает робастность метода.

Для верификации предложенного подхода проведено численное моделирование замкнутой системы с ПИД-регулятором и объектом (2) при различных значениях сетевой задержки. Моделирование выполнено методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,5$ мс.

На рисунке 1 представлены переходные процессы системы (реакция на единичное ступенчатое воздействие) при значениях задержки $\tau = 0, 20, 40, 60$ и 80 мс без использования компенсатора.

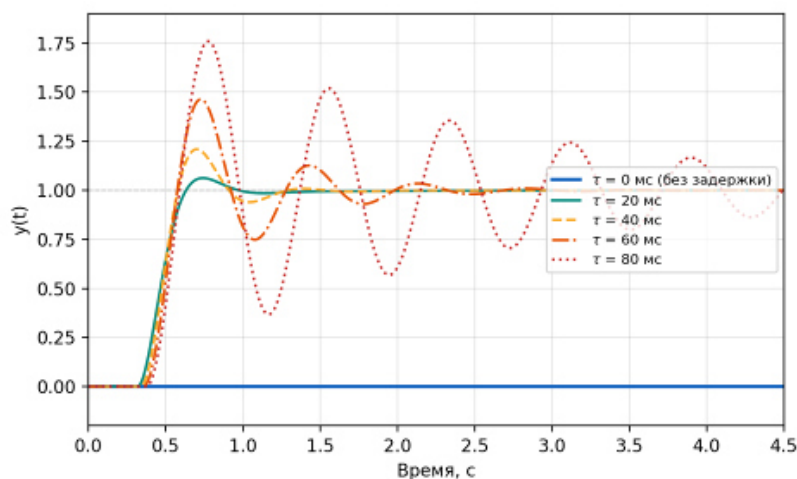


Рис. 1. Переходные процессы при различных значениях сетевой задержки

Как видно из рис. 1, увеличение задержки приводит к росту перерегулирования и колебательности переходного процесса. При $\tau = 40$ мс перерегулирование составляет около 21 %, при $\tau = 60$ мс – 46 %, а при $\tau = 80$ мс – 77 %, что свидетельствует о приближении системы к границе устойчивости. При $\tau > 90$ мс система теряет устойчивость.

На рисунке 2 представлено сравнение переходных процессов при задержке $\tau = 70$ мс: без компенсации, с предсказателем Смита, а также эталонный процесс без задержки.

Применение предсказателя Смита позволяет существенно уменьшить перерегулирование: с 61 % (без компенсации) до 22 % (с предсказателем), то есть в 2,7 раза. Время регулирования сокращается с 3,0 с до 1,3 с.

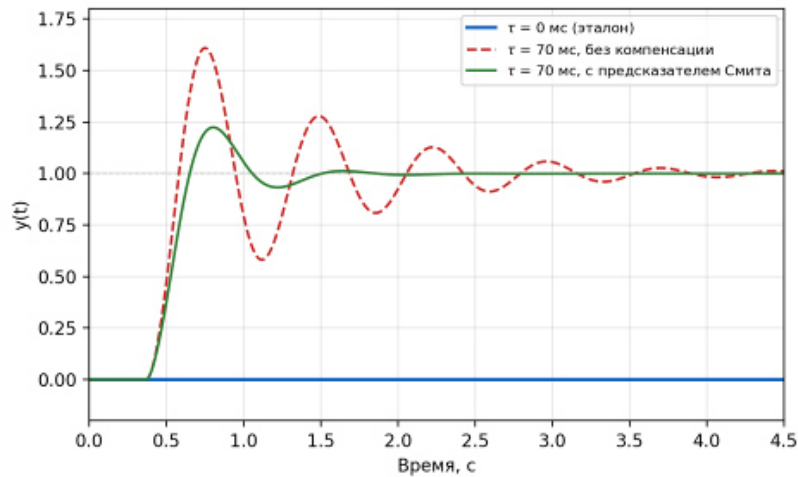


Рис. 2. Сравнение системы с компенсатором и без него ($\tau = 70$ мс)

Количественные показатели качества переходных процессов при различных задержках приведены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели качества переходных процессов

τ , мс	σ без комп., %	σ с комп., %	t_p без комп., с	t_p с комп., с
0	0	0	< 0,3	< 0,3
10	3,1	2,1	0,63	0,66
20	6,2	3,5	0,81	0,64
30	11,9	5,7	0,85	0,83
40	20,9	9,0	1,11	0,89
50	32,7	13,1	1,19	0,93
60	46,3	17,7	1,87	0,97
70	61,0	22,4	3,03	1,33
80	76,9	26,9	5,91	1,41

На рисунке 3 представлены зависимости перерегулирования и времени регулирования от величины задержки для системы без компенсации и с предсказателем Смита.

Анализ графиков (рис. 3) позволяет сделать следующие выводы. Без компенсации перерегулирование растёт нелинейно и достигает критических значений ($> 50\%$) при $\tau > 60$ мс. С предсказателем аналогичные значения перерегулирования достигаются лишь при $\tau > 150$ мс, что подтверждает расширение диапазона допустимых задержек примерно в 2,5 раза. Время регулирования без компенсации резко возрастает при $\tau > 70$ мс, тогда как с предсказателем оно остаётся приемлемым (менее 1,5 с) вплоть до $\tau = 85$ мс.

Следует отметить, что эффективность предсказателя Смита зависит от точности внутренней модели объекта. В данном моделировании модель принималась точной, что соответствует идеальному случаю. В реальных условиях неизбежна погрешность модели, которая снижает эффект компенсации. Исследование робастности метода при неточной модели представляет предмет дальнейших исследований.

В данной работе исследовано влияние сетевых задержек на устойчивость и качество функционирования распределённых систем автоматического управления. Разработана математическая модель замкнутого контура с ПИД-регулятором и объектом второго порядка при наличии транспортной задержки в канале обратной связи.

Проведённое численное моделирование показало, что при задержках свыше 60 мс перерегулирование превышает 46 %, а при задержках свыше 90 мс система теряет устой-

чивость. Это подтверждает необходимость учёта задержек при проектировании РСАУ на базе промышленного Ethernet.

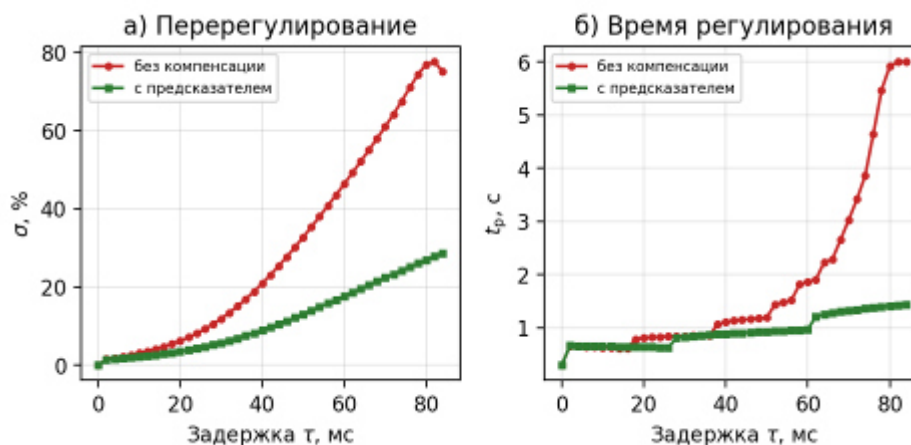


Рис. 3. Зависимости показателей качества от величины задержки:
а) перерегулирование; б) время регулирования

Предложен метод компенсации на основе предсказателя Смита, реализуемый в виде программной надстройки над существующим регулятором. Моделирование подтвердило, что применение предсказателя позволяет снизить перерегулирование в 2–3 раза и расширить диапазон допустимых задержек приблизительно в 2,5 раза.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов при модернизации АСУ ТП в химической, нефтегазовой и энергетической отраслях. Дальнейшие исследования предполагают экспериментальную верификацию на лабораторном стенде, а также анализ робастности метода при неточной модели объекта и наличии потерь пакетов.

Библиографические ссылки

1. Калюжный В. П. Проблема устойчивости цифровых регуляторов с сетевым способом доставки управляющих величин // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 4. – С. 92–99.
2. Mishra P., Yadav A. K., Patjoshi R. K. Delay compensation and stability analysis of networked control system: an IoT prospective // International Journal of Systems, Control and Communications. – 2025. – Vol. 16, No. 2. – P. 79–103.
3. Пассивное управление с задержками связи // Документация Exponenta [Электронный ресурс]. URL: https://docs.exponenta.ru/R2021a_nmtnew/control/ug/passive-control-with-communication-delays.html (дата обращения 12.02.2026).
4. Wang Y., Sun L., Tomizuka M. Predictor-based compensation for networked control systems with stochastic delays // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2021. – Vol. 66, No. 3. – P. 1355–1362.
5. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. – Research Triangle Park, NC: ISA, 2006. – 460 p.
6. Smith O. J. M. A controller to overcome dead time // ISA Journal. – 1959. – Vol. 6, No. 2. – P. 28–33.
7. Vatanski N., et al. Control compensation based on upper bound delay in networked control systems // Proceedings of the 17th MTNS. – Kyoto, Japan, 2006. – P. 1234–1241.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОСТАНОВКИ ПОД ОХРАНУ

Т. А. Ткаченко
Научный руководитель – С. В. Ченцов

Сибирский федеральный университет
660041, Красноярский край, г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79.
E-mail: tat18041970@mail.ru

Темой данной работы является разработка автоматического регулятора сигнализации для образовательного учреждения с использованием программной среды моделирования SimInTech. SimInTech

Ключевые слова: сигнализация, автоматический регулятор, программная среда моделирования SimInTech. SimInTech.

Введение

В современном мире при нарастающем уровне рисков террористического и экстремистского характера, безопасность образовательных учреждений занимает особое место в повседневной жизни различных категорий граждан. Надежная сигнализация и охрана образовательного учреждения позволяют обучающимся и работникам чувствовать себя спокойно и защищённо от возможных угроз и несанкционированного доступа в помещения образовательного учреждения. Современные системы охраны обеспечивают автоматическую сигнализацию при попытке взлома, контроль окон и входных дверей, а также возможность удалённого управления системой охраны. В условиях роста преступности и повышения требований к безопасности, использование современных технологий охраны становятся особенно важным аспектом обеспечения сохранности имущества, а также безопасности обучающихся и работников в период нахождения их в здании образовательного учреждения.

Целью данной работы является разработка автоматического регулятора сигнализации для образовательного учреждения с использованием программной среды моделирования *SimInTech. SimInTech*, предоставляющая широкий набор инструментов для разработки математических моделей, создания алгоритмов управления и их последующего анализа. Благодаря возможностям этой среды, можно разработать эффективный регулятор, учитывающий параметры конкретного образовательного учреждения и требования норм безопасности.

В рамках работы будут рассмотрены ключевые аспекты автоматизации управления, включая анализ требований к системе, разработку математической модели процесса регулирования и проектирование алгоритмов управления. Особое внимание уделено интеграции всех компонентов системы, что обеспечит ее корректную работу в реальных условиях.

Разработка автоматического регулятора охранной сигнализации в *SimInTech* позволяет не только детально изучить поведение системы в различных режимах работы, но и протестировать предложенные решения до их реального внедрения. Таким образом, результатом работы станет готовый к применению прототип системы автоматического регулирования охраны образовательного учреждения, который может быть использован для дальнейшего проектирования и адаптации к специфическим условиям.

1. Среда разработки

SimInTech (*Simulation In Technic*) – это российская среда динамического моделирования технических систем, которая активно применяется для проектирования, анализа и управления различными инженерными объектами. Она используется в разработке математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматизированной генерации кода для контроллеров и графических дисплеев. Это программное обеспечение широко применяется в промышленности, энергетике, машиностроении и других отраслях, требующих высокой точности в моделировании процессов.

Одной из ключевых особенностей *SimInTech* является его способность к моделированию нестационарных процессов, которые возникают в таких областях, как физика, электротехника, динамика машин и механизмов, а также теплопроводность и гидродинамика. Благодаря этим возможностям программа позволяет решать сложные инженерные задачи, которые раньше требовали значительных временных и ресурсных затрат.

SimInTech предоставляет пользователю широкий выбор библиотек моделирования. Например, для работы с теплогидравликой и пневматикой предусмотрены инструменты, позволяющие моделировать различные системы теплопередачи, гидравлические цепи и механизмы. В области электротехники доступны средства для анализа электрических цепей как в действующих, так и мгновенных значениях. Программа также поддерживает моделирование силовых машин, таких как гидравлические и пневматические устройства, а в механике предоставляет инструменты для исследования взаимодействий различных элементов конструкции.

Особое место в *SimInTech* занимает моделирование траекторий космических аппаратов и полетов летательных устройств в атмосфере. Эти возможности активно используются в аэрокосмической промышленности, где требуется высокая точность расчетов и возможность учёта множества факторов, влияющих на поведение объектов.

Для обработки данных и управления процессами *SimInTech* включает библиотеки цифровой обработки сигналов, статистики и анализа данных. Эти инструменты помогают разрабатывать алгоритмы управления и оптимизировать системы, делая их более эффективными. Кроме того, поддержка протоколов обмена данными (таких как *OPC*, *UDP*, *TCP/IP*, *MODBUS* и других) позволяет интегрировать *SimInTech* с различным программным обеспечением и оборудованием, расширяя его функциональные возможности.

Программа обладает развитым функционалом для создания интерфейсов управления, таких как *SCADA*-системы, которые обеспечивают удобное взаимодействие оператора с моделируемой системой. Это особенно важно при работе с крупными промышленными объектами, где требуется наглядное и интуитивно понятное управление сложными процессами.

SimInTech поддерживает работу в многокомпьютерных моделирующих комплексах. Это значит, что расчеты могут быть распределены между несколькими вычислительными узлами, что значительно ускоряет процесс моделирования сложных систем. Кроме того, программа предоставляет инструменты для групповой разработки и сопровождения проектов на всех этапах их жизненного цикла, что делает её незаменимым инструментом в крупных инженерных командах.

Ещё одной важной функцией *SimInTech* является возможность анализа надежности, безопасности и живучести систем. Это особенно важно в отраслях, связанных с эксплуатацией сложных технических объектов, где ошибки могут привести к серьезным последствиям. Анализ на уровне принципиальных схем позволяет выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях проектирования и снижать риски их появления в реальных условиях.

Программа включает встроенные модули для работы с нейронными сетями и обработки видео. Это делает её универсальным инструментом для современных задач, свя-

занных с искусственным интеллектом и обработкой больших массивов данных. Например, библиотеки нейронных сетей позволяют использовать технологии машинного обучения для прогнозирования и оптимизации процессов, а инструменты видеобработки полезны при анализе визуальных данных, таких как изображения с камер наблюдения или данные с приборов визуализации.

SimInTech активно используется в российской промышленности благодаря своим уникальным возможностям, простоте интеграции с другими решениями и высокому уровню поддержки локальных пользователей. В эпоху цифровизации и автоматизации это программное обеспечение остается одним из лидеров на рынке систем моделирования, предлагая эффективные и доступные инструменты для решения сложных инженерных задач.

2. Описание проекта

В ходе работы в программе *SimInTech* 64 был реализован проект, состоящего из проекта модели системы, окна анимации и базы данных, хранящей необходимые переменные. Все файлы находятся в одной отдельной папке.

Для запуска примера можно запустить проект в формате «НЕГотово.prt» или же открыть его в *SimInTech* через меню Файл – Открыть, а затем выбрать нужный файл.

3. Реализация проекта

3.1. Охраняемый объект

Объект представляет собой здание образовательного учреждения, имеющее 6 окон, 1 дверь и трубу. Для наглядности здание образовательного учреждения представлено на рисунке 1.

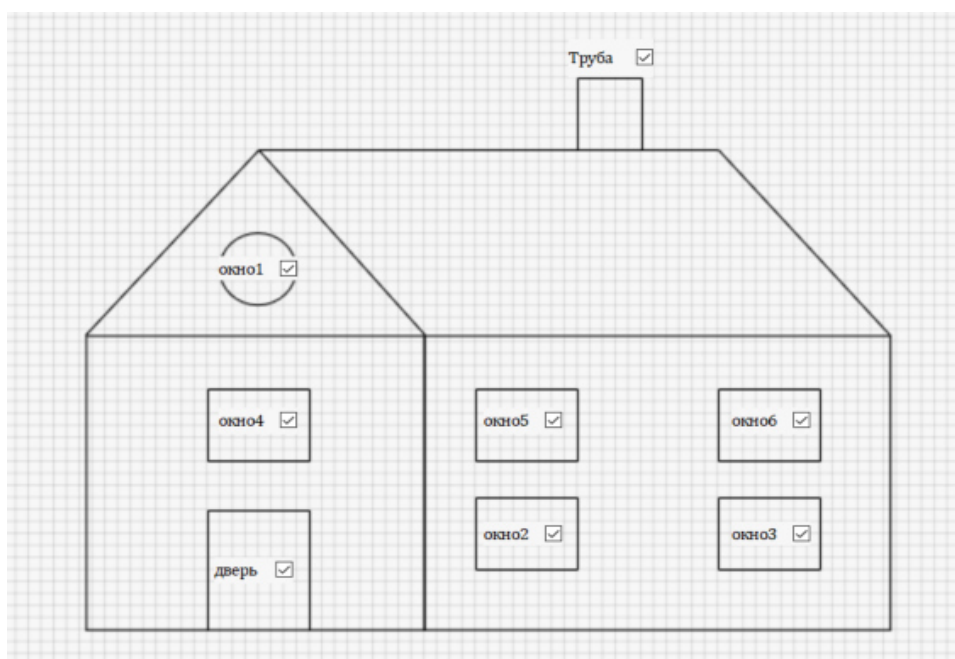


Рис. 1. Охраняемый объект

В проекте мы предполагаем возможность выбора конкретной части здания для постановки под охрану. С помощью галочки можно включить или выключить единицу (окно, дверь, трубу) в список, попадающий под постановку на охрану.

Для реализации нашего проекта мы определили, что в системе будут использоваться восемь датчиков – по одному на трубу и дверь, и шесть – на окна.

Скрипт представлен на ниже:

```

// состояние окон и двери
var w1,w2,w3,w4,w5,w6,d,f: integer;
if w1.Value=0 then x1=0;
if w1.Value=1 then x1=1;
if w2.Value=0 then x2=0;
if w2.Value=1 then x2=1;
if w3.Value=0 then x3=0;
if w3.Value=1 then x3=1;
if w4.Value=0 then x5=0;
if w4.Value=1 then x5=1;
if w5.Value=0 then x6=0;
if w5.Value=1 then x6=1;
if w6.Value=0 then x7=0;
if w6.Value=1 then x7=1;
if d.Value=0 then x4=0;
if d.Value=1 then x4=1;
if f.Value=0 then x8=0;
if f.Value=1 then x8=1

```

Описание проекта в формате «.prt». Общий вид системы представлен на рисунке 2.

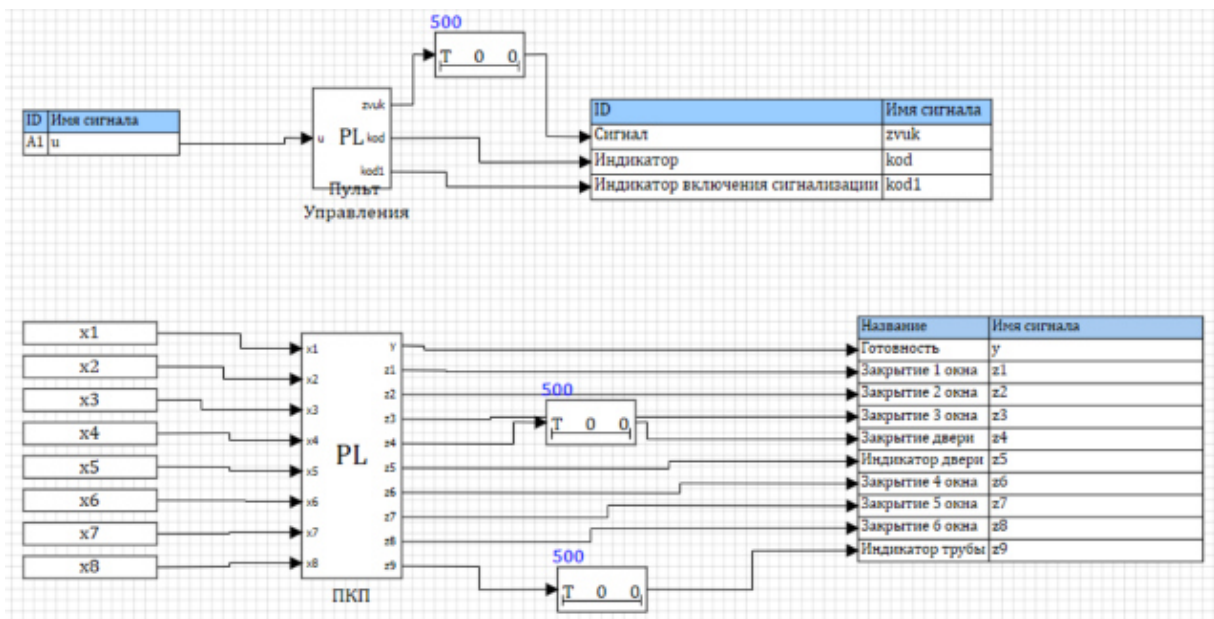


Рис. 2. Вид проекта в среде *SimInTech*

3.2. Алгоритм работы программы

Алгоритм работы программы простой:

- постановка на сигнализацию каждой единицы охраняемого объекта;
- введение кода для снятия сигнализации;
- при неверно введенном коде – программа подаст звуковой сигнал о несанкционированном доступе;
- при введении верного кода – доступ к охраняемому объекту будет получен.

Для отображения в окне анимации действующих состояний в базу сигналов записываются их действительные значения. На рисунке 3 представлено окно анимации.

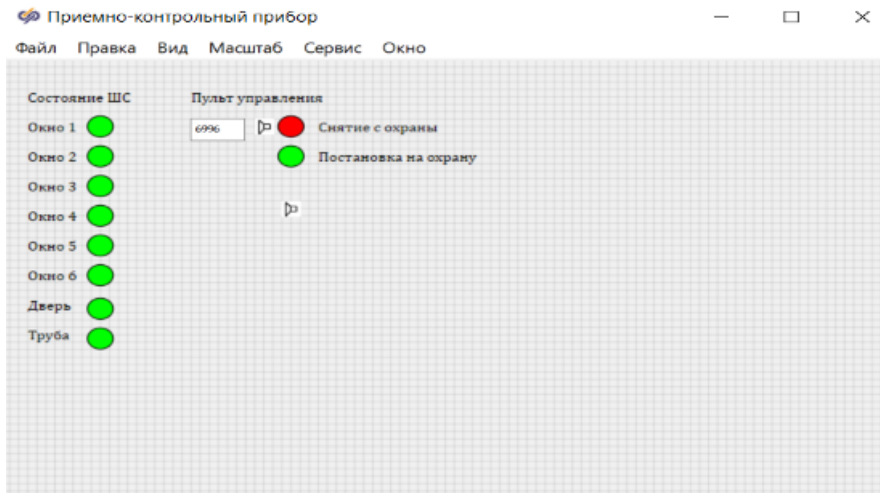


Рис. 3. Окно анимации

Цвет рядом с объектами здания указывает на состояние сигнализации этой единицы. Он меняется в зависимости от наличия галочки рядом с названием на рисунке 1. Если рядом зеленый цвет – это значит, что объект находится под охраной. Если рядом красный цвет – это значит, что объект под охрану не попадает.

Для того, чтобы поставить образовательное учреждение под охрану необходимо ввести код «6996». Зеленым цветом загорится круг «Постановка под охрану». Если в любую единицу, например, в окно 2, будет несанкционированный доступ, то сработает аудио-сигнализация. Для повторного включения под охрану необходимо вновь поставить галочку в окно 2.

Если несанкционированный доступ будет в «Пульт управления», то есть введут неправильный код, то также сработает аудиосигнализация с задержкой в соответствии с рисунком 4.

Задержка сигнализации может быть задана в свойствах объекта. На рисунке 4 можно увеличить задержку до более реальной величины, чтобы дежурный охранник успел ввести код для снятия охраняемого объекта с сигнализации.

Название	Имя	Формула	Значение
Массив времён подтверждения, сек	tau		[500]

Рис. 4. Задержка сигнализации

Текст скрипта для работы окна анимации, показанного на рисунке 3, представлен ниже:

```

initialization
end;
// пульт управления
var c: integer; c=1;
var i: integer; i=1;
u = vali(Editor.Text,c);
if kod=0 then FillCircle4.Color=255;
if kod=1 then FillCircle4.Color=65280;
if kod1=0 then FillCircle5.Color=255;
if kod1=1 then FillCircle5.Color=65280;
if kod1=0 then

```

```

begin
Sound.FileName = "Track.wav";
Sound.Value=0;
if zvuk=1 then Sound.Value=1;
if zvuk=0 then Sound.Value=0
end;
//Индикатор двери
if z5=0 then FillCircle3.Color=65280;
if z5=1 then FillCircle3.Color=255;
//Индикатор трубы
if z9=0 then FillCircle9.Color=65280;
if z9=1 then FillCircle9.Color=255;
//Индикаторы окон
if z1=0 then FillCircle.Color=65280;
if z1=1 then FillCircle.Color=255;
if z2=0 then FillCircle1.Color=65280;
if z2=1 then FillCircle1.Color=255;
if z3=0 then FillCircle2.Color=65280;
if z3=1 then FillCircle2.Color=255;
if z6=0 then FillCircle6.Color=65280;
if z6=1 then FillCircle6.Color=255;
if z7=0 then FillCircle7.Color=65280;
if z7=1 then FillCircle7.Color=255
if z8=0 then FillCircle8.Color=65280;
if z8=1 then FillCircle8.Color=255
// Сигнализация при открытии окон и двери
if kod1=1 then
begin
Sound1.Value=0;
Sound1.FileName = "Track.wav";
if z1=1 then Sound1.Value=1;
if z2=1 then Sound1.Value=1;
if z3=1 then Sound1.Value=1;
if z4=1 then Sound1.Value=1;
if z6=1 then Sound1.Value=1;
if z7=1 then Sound1.Value=1;
if z8=1 then Sound1.Value=1;
if z9=1 then Sound1.Value=1;
end

```

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана система автоматизированной сигнализации для образовательного учреждения с использованием среды моделирования *SimInTech*. Разработана математическая модель и спроектирован алгоритм управления, который обеспечивает охрану помещений в здании образовательного учреждения.

Результаты работы подтверждают, что применение среды *SimInTech* позволяет эффективно моделировать сложные системы управления, анализировать их поведение и оптимизировать параметры работы. Разработанный регулятор демонстрирует высокую точность и стабильность в поддержании заданных параметров, что отвечает требованиям безопасности и удобства эксплуатации.

Разработанный прототип может быть адаптирован для реального применения в различных типах зданий образовательных учреждений. Предложенные решения подчеркивают актуальность автоматизации управления охраной в образовательных учреждениях и могут служить основой для дальнейших разработок в области интеллектуальных систем управления на социально значимых объектах, что открывает перспективы для их применения в современном строительстве и эффективной эксплуатации зданий и сооружений.

Библиографические ссылки

1 ГОСТ 92-8605-2008 Нормативный документ по стандартизации РКТ. Помещения производственные для изготовления микроэлектронных изделий и печатных плат. Общие требования. – М.: Федеральное космическое агентство, 2008, – 55 с.

2 Свод правил СП 77.13330 «СНиП 3.05.07-85 Системы автоматизации». – Введ. 2016-10-20. – М.: Стандартинформ. – 130 с.

3 СТО 7.5.04-2019. Общие требования к построению, изложению и оформлению работ обучающихся : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» от 27 сентября 2019 г. № 1797 : дата введения 2019-10-01. – Текст : непосредственный.

© Ткаченко Т. А., 2026

ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УДАЛЁННОГО ДОСТУПА НА ОСНОВЕ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ ВЕН ЛАДОНИ

Э. В. Арбузов

Научный руководитель – Г. М. Гринберг

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail edgar9@inbox.ru

В статье рассматриваются вопросы принципы построения, испытаний и комплексной диагностики автоматизированных систем контроля и управления доступом (АСКУД), использующих биометрическую идентификацию по рисунку вен ладони. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения беспрецедентного уровня защищённости критически важной инфраструктуры, сочетающего высокую надёжность аутентификации, устойчивость к экстремальным условиям эксплуатации и соответствие строгим нормативным требованиям.

На основе анализа технических характеристик современных российских разработок, таких как сканеры серии PalmJet компании Biosmart, обосновывается выбор данной технологии для применения на объектах ракетно-космической отрасли.

Существенное внимание в работе уделено методологии проведения климатических, механических и специализированных кибернетических испытаний, направленных на верификацию ключевых параметров: вероятности ложного доступа (FAR), вероятности ложного отказа (FRR), скорости идентификации и устойчивости к спуффинг-атакам.

Ключевые слова: биометрическая идентификация, вены ладони, СКУД, безопасность, ракетно-космическая отрасль, испытания, диагностика, FAR, FRR.

Повышение уровня защищённости объектов критической инфраструктуры, к которым в полной мере относятся предприятия ракетно-космической отрасли, является стратегической задачей государственной важности. Традиционные системы контроля доступа, основанные на механических ключах, картах доступа или PIN-кодах, обладают принципиальными уязвимостями: идентификатор может быть утерян, передан, похищен или подделан [1].

В этой связи наблюдается устойчивая мировая тенденция к внедрению биометрических технологий, использующих для аутентификации уникальные физиологические характеристики человека. Среди многообразия биометрических методов идентификация по рисунку подкожных вен ладони демонстрирует ряд преимущественных особенностей, делающих её перспективной для применения в высокозащищённых комплексах [2; 3].

Актуальность настоящего исследования заключается в необходимости комплексного анализа не только эксплуатационных преимуществ технологии, но и, что наиболее важно, методологии её всесторонних испытаний и диагностики в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации на объектах космической промышленности. К таким условиям относятся широкий диапазон рабочих температур, повышенная вибрационная и электромагнитная нагрузка, требования к высокой пропускной способности и минимальному времени аутентификации в условиях чрезвычайной ситуации, а также необходимость интеграции с существующими комплексными системами безопасности.

1. Технология биометрической идентификации по венам ладони: принципы и особенности

1.1. Физические основы метода

В основе технологии распознавания по венам ладони лежит оптический метод, использующий особенности поглощения инфракрасного (ИК) излучения гемоглобином крови. Сканер генерирует ИК-излучение определённой длины волны (как правило, в диапазонах 850 нм и 940 нм для мультиспектрального сканирования) и направляет его на ладонь пользователя [1,4].

Кровь, циркулирующая в венозных сосудах, активно поглощает ИК-лучи, в то время как окружающие ткани (кожа, жировая прослойка, кости) обладают иными отражающими свойствами. В результате на матрице камеры сканера формируется чёткий контрастный образ сосудистого рисунка в виде тёмных линий на светлом фоне [4,5].

Важнейшей отличительной чертой данной биометрической характеристики является её скрытость. В отличие от отпечатков пальцев или изображения лица, рисунок венозной сети расположен под кожей, на глубине 3-5 мм, что делает его невидимым в обычных условиях и крайне сложным для несанкционированного копирования или воспроизведения [1].

Полученное изображение обрабатывается специализированными алгоритмами, которые выделяют уникальные узлы и особенности рисунка, преобразуя их в цифровой шаблон (биометрический дескриптор) размером порядка 2 Кб. Именно этот зашифрованный шаблон, а не само изображение, хранится в базе данных системы или на персональном смарт-идентификаторе, что дополнительно повышает защищённость персональных данных пользователей [4].

1.2. Сравнительные преимущества для применения в высокозащищённых комплексах. Для ракетно-космической отрасли, где персонал может работать в специфических условиях (например, в цехах сборки, на испытательных стендах, в чистых помещениях), критически важны не только показатели безопасности, но и эксплуатационная надёжность биометрического считывателя. Идентификация по венам ладони обладает рядом преимуществ перед другими биометрическими методами.

Во-первых, это высокая устойчивость к изменениям состояния поверхности кожи. На качество распознавания практически не влияют такие факторы, как загрязнения ладоней маслами, пылью, краской, наличие влаги, мелких порезов, ссадин или мозолей, а также возрастные изменения эпидермиса [2,3]. Это выгодно отличает её от дактилоскопии, где подобные факторы часто приводят к сбоям.

Во-вторых, технология является бесконтактной или низкоконтактной. Современные сканеры, такие как PalmJet, способны считать биометрический параметр на расстоянии от 4 до 10 см от считывателя [1]. Это отвечает повышенным требованиям гигиены, что особенно актуально в свете эпидемиологических рисков, а также исключает механический износ сенсора и остаточные отпечатки, которые потенциально могут быть использованы для создания муляжа.

В-третьих, технология демонстрирует исключительно низкие показатели ошибок. Согласно техническим данным ведущего российского производителя Biosmart, коэффициент вероятности ложного доступа (False Acceptance Rate, FAR) для их оборудования находится в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-8} , а скорость верификации (1:1) составляет менее 0.5 секунды. Столь высокая точность при минимальном времени обработки запроса является ключевым требованием для систем доступа на режимные объекты, где недопустимы как несанкционированное проникновение, так и задержки в проходе для авторизованного персонала.

2. Специфика требований ракетно-космической отрасли к автоматизированным системам контроля и управления доступом

Предприятия космической индустрии представляют собой сложный комплекс различных зон с разным уровнем секретности и допуска: административные корпуса, кон-

структурские бюро, закрытые лаборатории, производственные цеха, склады компонентов, стартовые комплексы. Система контроля доступа должна обеспечить жёсткое разграничение доступа между этими зонами, вести детальный учёт времени нахождения персонала в каждой из них и обладать устойчивостью к работе в специфических условиях производственной среды.

Климатические и механические нагрузки. Оборудование, устанавливаемое на территории технических позиций или в неотапливаемых производственных помещениях, должно сохранять работоспособность в широком диапазоне температур. Отечественные производители, например, указывают на адаптацию своего оборудования к работе при отрицательных температурах. Однако для космической отрасли требуются подтвержденные испытаниями характеристики при экстремальных значениях, характерных для региона размещения объекта (например, от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$). Не менее важны устойчивость к повышенной влажности, запылённости (степень защиты корпуса не ниже IP65) и, что особенно значимо, к вибрационным нагрузкам, которые могут возникать от работы тяжёлого оборудования, испытаний двигателей или транспортировки крупногабаритных элементов [4].

Требования информационной безопасности и нормативного соответствия. Биометрические данные относятся к особой категории персональных данных. В Российской Федерации их обработка регулируется Федеральным законом № 152-ФЗ «О персональных данных» и рядом подзаконных актов. Существенным правовым преимуществом технологии идентификации по венам является тот факт, что, согласно позиции регулятора, сканируемое изображение венозного рисунка может не квалифицироваться как биометрические персональные данные, поскольку для его получения требуется специальное оборудование, и оно не является общедоступным визуальным образом человека [2]. Это упрощает правовые процедуры внедрения. Тем не менее, система в целом должна соответствовать требованиям руководящих документов ФСТЭК России по защите информации, включая шифрование каналов передачи данных, аутентификацию контроллеров и безопасное хранение шаблонов.

Интеграция в комплексные системы безопасности. АСКУД редко функционирует изолированно. На объектах критической инфраструктуры она должна быть интегрирована с системами видеонаблюдения, охранно-пожарной сигнализации, электронными журналами и, возможно, системами досмотра. Современные биометрические считыватели, такие как {PalmJet ВОХ-Т}, уже предусматривают возможность интеграции бесконтактного датчика температуры, что позволяет осуществлять дополнительный контроль состояния здоровья сотрудника в момент прохода [1]. Гибкость интеграции через стандартные промышленные интерфейсы (Wiegand, Ethernet, RS-485) и поддержка протоколов взаимодействия являются обязательным условием выбора.

3. Методология испытаний и диагностики автоматизированных систем контроля и управления доступом

Внедрение АСКУД на основе биометрии вен ладони на объекте повышенной ответственности должно предваряться всесторонними приёмо-сдаточными и квалификационными испытаниями. Их цель – эмпирически подтвердить соответствие заявленных производителем характеристик реальным условиям эксплуатации и выявить потенциальные слабые места системы.

3.1. Климатические и механические испытания. Программа испытаний должна моделировать наихудшие сценарии условий окружающей среды.

Испытания на термостатирование и влагуустойчивость. Считыватель, контроллер и исполнительные устройства (электромеханические замки, турникеты) помещаются в климатическую камеру. Испытательный цикл включает в себя выдержку при минимальной и максимальной рабочих температурах в течение не менее 24 часов с последующим циклиро-

ванием температур для выявления эффектов усталости материалов. В процессе каждого этапа проводится проверка базовой функциональности: считывание тестового шаблона, передача команды на реле, скорость отклика. Отдельно проводится тестирование на конденсацию влаги и работу при высокой относительной влажности (до 95%).

Виброустойчивость и ударные нагрузки. Для имитации вибраций, возникающих на производстве или при транспортировке, оборудование закрепляется на вибростенде [4]. Испытания проводятся в диапазоне частот, характерном для промышленных объектов, с заданными амплитудами виброускорения. После воздействия проверяется отсутствие механических повреждений, сохранность данных в памяти, надёжность всех электрических соединений и, главное, точность биометрического распознавания.

3.2. Специализированные биометрические испытания. Данная группа испытаний направлена на верификацию ключевых показателей эффективности биометрического ядра системы.

Определение вероятности ложного доступа (FAR) и ложного отказа (FRR). FAR – это вероятность того, что система ошибочно идентифицирует постороннего человека как зарегистрированного пользователя. FRR – вероятность того, что система не узнает зарегистрированного пользователя.

Для их определения создаётся база данных, содержащая, например, 1000 уникальных шаблонов. Затем осуществляется попытка верификации для каждой пары «свой-чужой» по специально разработанной методике. Объём выборки должен быть статистически значимым для получения достоверных значений. Ожидаемые значения, как отмечалось, должны быть на уровне $FAR \leq 10(-5)$ и $FRR \leq 0.01\%$ [5].

Испытания на устойчивость к спуффинг-атакам. Это проверка способности системы отличать живую ладонь от муляжа или фотографии. Для проведения испытаний создаются различные артефакты: высококачественные фотографии венозного рисунка, полученные в ИК-спектре; слепки ладони из силикона или другого материала с имитацией венозного рисунка. Система должна гарантированно отвергать все попытки аутентификации с использованием таких подделок.

Испытания на скорость и пропускную способность. Замеряется полное время от момента поднесения ладони до срабатывания исполнительного устройства. Для системы, работающей в режиме идентификации (1:N), замеряется зависимость времени отклика от размера базы данных (N=100, 1000, 10000 шаблонов). Эти данные необходимы для расчёта пропускной способности пункта прохода, особенно в часы пиковой нагрузки.

3.3. Диагностика и мониторинг в процессе эксплуатации. После успешного внедрения система требует регулярной диагностики для поддержания заданного уровня надёжности. Диагностический контур должен включать:

Постоянный мониторинг аппаратного состояния. Контроллеры системы должны осуществлять периодический опрос считывателей на наличие ошибок, проверять целостность линий связи с исполнительными устройствами, отслеживать параметры электропитания. Данные телеметрии должны фиксироваться в системном журнале.

Периодический аудит биометрической эффективности. В процессе эксплуатации возможно постепенное изменение качества распознавания из-за загрязнения оптики считывателя, старения элементной базы или программных сбоев. Рекомендуется проводить ежеквартальные контрольные замеры показателей FAR и FRR на тестовой группе пользователей. Также следует анализировать журналы событий на предмет аномального роста количества ошибок верификации у конкретных пользователей или в определённое время суток.

Диагностика устойчивости к сбоям и восстановления. Имитируется аварийное отключение основного питания с переходом на резервное, отказ сетевого соединения между контроллером и сервером. Система должна либо сохранять работоспособность в автономном режиме, используя локальную базу данных на контроллере, либо корректно восстанавливать работу после устранения сбоя без потери данных событий [4].

Биометрическая технология идентификации по рисунку вен ладони, представленная на российском рынке конкурентоспособными разработками, такими как продукция компании Biosmart, представляет собой зрелое и высоконадёжное решение для задач контроля доступа. Её ключевые преимущества – скрытость биометрического признака, высокая точность распознавания, устойчивость к внешним условиям и гигиеничность бесконтактного взаимодействия – делают её высокоадаптивной к строгим требованиям ракетно-космической отрасли.

Однако успешное внедрение такой системы в критически важную инфраструктуру невозможно без тщательно разработанной и всеобъемлющей программы испытаний и диагностики. Как показано в работе, программа должна выходить за рамки стандартных проверок и включать в себя не только климатические и механические тесты, но и углублённую оценку биометрических показателей (FAR, FRR) в смоделированных условиях эксплуатации, а также тестирование на устойчивость к целенаправленным атакам.

Особое значение имеет построение системы постоянного диагностического мониторинга, которая позволит поддерживать высокий уровень безопасности на протяжении всего жизненного цикла АСКУД. Дальнейшие исследования в данной области целесообразно направить на разработку унифицированных отраслевых стандартов и методик испытаний биометрических СКУД, а также на создание интеллектуальных систем диагностики, способных прогнозировать отказы на основе анализа накопленных данных телеметрии и биометрической эффективности. Внедрение подобных систем станет существенным вкладом в обеспечение беспрецедентного уровня защиты объектов, определяющих технологический и оборонный суверенитет государства.

Результаты проведённого анализа свидетельствуют о том, что биометрические СКУД на основе вен ладони обладают значительным потенциалом для создания защищённых, бесконтактных и гигиеничных пунктов прохода на объектах ракетно-космического назначения.

Библиографические ссылки

1. СКУД без ключей и карт. Идентификация по ладони – доступ в бизнес XXI века. BioSmart. 2021. URL: <https://bio-smart.ru/blog/dostup-bez-kluchei-i-kart> (дата обращения: 19.01.2026).
2. СКУД: идентификация по венам ладони! Universe-Soft. 2025. URL: <https://universe-soft.ru/skud-vein/> (дата обращения: 22.01.2026).
3. Установка и настройка СКУД "Biosmart" на основе биометрической идентификации по венам ладони. LIR-Samara. URL: https://lir-samara.ru/uslugi/skud/identification_by_the_veins_of_the_palm (дата обращения: 23.01.2026).
4. PALM JET – сканер бесконтактной идентификации по рисунку вен ладони. Национальная технологическая инициатива / Университет 2035. 2024. URL: <https://pt.2035.university/project/palm-jet-skaner-beskontaktnoj-identifikacii-po-risunku-ven-ladoni> (дата обращения: 22.01.2026).
5. По венам ладони. ZKTeco.pro. URL: <https://zkteco.pro/all/bioacs-palm.html> (дата обращения: 16.01.2026).

© Арбузов Э. В., 2026

ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ ОРИЕНТАЦИИ НА СОЛНЦЕ

Д. М. Морозова
Научный руководитель – Г. М. Гринберг

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail moroznyk0_0@mail.ru

Современные космические системы требуют высокой точности и надежности в управлении ориентацией космических аппаратов для обеспечения их эффективной работы и выполнения поставленных задач. Одним из ключевых элементов системы ориентации является прибор, предназначенный для определения положения аппарата относительно солнечного источника. Технологии испытаний таких приборов играют важную роль в обеспечении их работоспособности в условиях космоса, где отсутствует возможность проведения ремонтных и калибровочных процедур. Эффективные методы испытаний позволяют выявить возможные недостатки и повысить надежность системы ориентации, что особенно актуально в условиях длительных космических миссий и требований к точности навигации и управления.

Ключевые слова: приборы ориентации на солнце, технология испытаний

Актуальность данной темы обусловлена ростом количества и сложности космических аппаратов, которые все чаще используют системы ориентации на солнце для навигации, энергопитания и стабилизации. В условиях современного космического пространства развитие и совершенствование технологий испытаний прибора ориентации на солнце становится необходимым условием для повышения его надежности и долговечности. Кроме того, внедрение новых методов испытаний способствует снижению затрат на подготовку и запуск космических аппаратов, а также повышает их эффективность в условиях эксплуатации.

Принцип работы и конструктивные особенности приборов ориентации на солнце

Определение ориентации космического аппарата (КА) в пространстве является фундаментальной задачей для обеспечения успешного выполнения миссии, поскольку от точности ориентации зависит эффективность работы бортовых систем, точность навигации и выполнение запланированных научных задач. [1]

Одним из наиболее широко используемых методов является оптико-стереографический способ, основанный на использовании солнечных датчиков (рисунок 1).

Эти устройства позволяют определять направление на Солнце с высокой степенью точности (до нескольких угловых минут), что особенно важно для малых спутников и космических аппаратов, работающих в условиях ограниченных ресурсов по питанию и вычислительным возможностям. Принцип их работы заключается в обнаружении солнечного излучения и определении его направления относительно корпуса аппарата. При этом, для повышения надежности и точности, в системах используют комбинацию солнечных сенсоров с другими датчиками и системами ориентации, что позволяет компенсировать возможные погрешности и сбои.

Основной принцип функционирования приборов ориентации на солнце – это преобразование солнечного излучения в электрический сигнал, который затем интерпретируется для определения географического положения относительно Солнца. В большинстве

современных систем реализуется принцип фотовольтаического преобразования, основанный на использовании солнечных элементов, обычно тонкоплёночных или кристаллических кремниевых фотогальванических элементов, обладающих высокой чувствительностью к спектру солнечного излучения. Эти элементы формируют чувствительный блок прибора (фотоэлементы), преобразующий энергию света в электрический ток, параметры которого (напряжение, ток) служат для определения направления на Солнце.

Конструктивные особенности таких приборов обусловлены точности ориентирования и устойчивости к внешним воздействиям. В частности, в качестве элементов чувствительности широко применяются фотодетекторы с узконаправленным полем обзора, что обеспечивает минимизацию влияния рассеянного света и межсезонных солнечных эффектов. Для повышения точности определения направления используют многосегментные фотодетекторы или массивы фотодатчиков, расположенных по определенной геометрической схеме, зачастую в виде радиальных или секторных сегментов.

Важной особенностью является наличие системы автоматической калибровки и компенсации ошибок, вызванных изменением температуры, деградацией элементов или внешними магнитными полями.

Типичные конструкции включают в себя системы оптической фильтрации, позволяющие исключить влияние паразитных излучений и обеспечить спектральную селективность. Для стабилизации положения и повышения точности ориентирования применяются такие элементы, как гироскопы, акселерометры и магнитометры, интегрированные в систему управления.

Ключевым аспектом в конструкции приборов ориентации является использование методов обработки сигнала, включающих фильтрацию, сравнение сигналов с эталонными значениями и применение алгоритмов на базе теории оптимизации, таких как фильтр Калмана (рисунок 2).



Рис. 1 Определение ориентации



Рис. 2 – Инерциальные навигационные системы с совмещением показаний от разнородных датчиков при помощи фильтра Калмана

Эти методы обеспечивают устойчивость системы к шумам, временным задержкам и ошибкам калибровки. В результате, система способна точно определить направление на солнце с высокой точностью и быстро реагировать на изменения положения космического аппарата.

Методы калибровки и настройки приборов. В условиях космической среды, где даже минимальные погрешности могут привести к существенным отклонениям в ориентации и навигации, применение строгих методов калибровки становится обязательным. Эти методы позволяют устранить систематические ошибки, обусловленные несовершенствами в конструкции, а также обеспечить стабильность и воспроизводимость измерений в условиях космоса.

Первым этапом в обеспечении высокой точности является проведение предварительной калибровки на наземных стендах, где создаются условия, максимально приближенные к рабочим. В рамках этой процедуры используют эталонные источники, такие как лазеры, эталонные солнечные симуляторы и специализированные оптические платформы. Особое значение имеет калибровка фотометрических и спектроскопических датчиков, которая осуществляется с помощью стандартных источников известной интенсивности и спектральных характеристик. В процессе калибровки выполняется сопоставление измеряемых величин с эталонными значениями, что позволяет выявить систематические смещения и определить коэффициенты коррекции.

Следующим важным аспектом является настройка приборов. В отличие от калибровки, которая нацелена на выявление и устранение ошибок, настройка подразумевает регулировку параметров устройства для достижения оптимальной работы в условиях эксплуатации. Например, в приборах ориентации на солнце регулируют углы наклона и ориентации сенсорных элементов, а также параметры алгоритмов обработки сигналов. Важную роль играет автоматическая калибровка с помощью программных средств, которые позволяют осуществлять динамическую корректировку в реальном времени, что особенно актуально в условиях космических миссий, где доступ к аппаратуре ограничен.

Для повышения точности измерений применяются методы межкалибровки, основанные на сравнении результатов различных датчиков, установленных на одном аппарате. Такой подход способствует устранению ошибок, обусловленных различиями в характеристиках элементов сенсорных систем. В рамках межкалибровки используют методы статистической обработки данных, такие как фильтрация Калмана, что позволяет снизить влияние шума и случайных погрешностей на итоговые результаты.

Также особое значение имеют методы автоматической и динамической калибровки, которые позволяют учитывать изменения характеристик приборов в процессе длительной эксплуатации [2].

Особенности моделирования работы в условиях космической среды. Прежде всего, необходимо учитывать экстремальные температуры, характерные для космической среды, где температура может меняться от значений ниже $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в тени до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ на солнечной стороне. В рамках моделирования такие условия реализуются посредством термостатных камер и систем термической регулировки, что позволяет имитировать тепловой режим, в котором будет функционировать прибор в космосе. Важным аспектом является также моделирование радиационного фона, включающего солнечное излучение, космическую радиацию и альбедо – отражение солнечных лучей поверхностью планеты или спутника. Радиоизлучение оказывает существенное влияние на параметры работы приборов, вызывая деградацию материалов, повышение уровня шумов и ошибочные сигналы.

Особое место занимает моделирование воздействия плазменных условий, связанных с магнитосферой и солнечным ветром. В лабораторных условиях это реализуется с помощью плазменных камер и электромагнитных генераторов, что позволяет оценить устойчивость приборов к электромагнитным помехам и воздействию высоких энергий частиц.

Влияние магнитных полей и частиц космической радиации на чувствительные части приборов является критическим фактором, способным приводить к сбоям в работе или к необратимым повреждениям [3].

При моделировании условий космической среды необходимо учитывать также влияние микрогравитации и вибраций, возникающих в процессе запуска и эксплуатации космического аппарата. Эти параметры достигаются с помощью вибрационных стендов и систем имитации микрогравитационных условий, что важно для оценки долговечности и стабильности работы устройств ориентации. Влияние вибраций особенно важно при испытании систем стабилизации, так как оно может вызвать смещения или деформации, снижающие точность ориентации.

Стандарты и нормативные требования к испытаниям приборов ориентации на солнце. Стандарты и нормативные требования к испытаниям приборов ориентации на солнце являются неотъемлемой частью обеспечения надежности и точности функционирования систем управления космических аппаратов. В современном космическом приборостроении, особенно в контексте систем автоматической ориентации, предъявляются строгие критерии, регламентирующие как методики проведения испытаний, так и параметры, подлежащие контролю. Эти стандарты основаны на международных и национальных документах, таких как стандарты IEEE, ISO, ГОСТ, ОСТ а также отраслевые нормативы, разработанные космическими агентствами. Их целью является минимизация ошибок определения солнечного вектора и повышение точности навигационных вычислений в условиях космического пространства.

Ключевым аспектом нормативных требований является обеспечение воспроизводимости результатов испытаний и их соответствия реальным условиям эксплуатации. В этом контексте применяются стандарты, регламентирующие методики имитации солнечного излучения – например, использование солнечных симуляторов, основанных на спектральных источниках, таких как кварцевые галогенные лампы или лазерные системы, способные моделировать спектральный состав и интенсивность солнечного излучения. Важным аспектом является также контроль температуры, влажности и электромагнитных помех, что обеспечивает стабильность и точность измерений.

Нормативные требования подчеркивают необходимость проведения испытаний в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным. В рамках стандартов предусматриваются процедуры определения угловых ошибок, чувствительности к углам наклона и точности определения положения солнца при различных ориентациях прибора. Например, нормативы требуют, чтобы погрешность определения солнечного вектора не превышала определённого значения (часто выраженного в долях градуса или в минутах дуги), что особенно критично для систем автоматической навигации и управления. Важно отметить, что такие параметры подлежат статистической обработке с использованием методов теории ошибок, что позволяет определить вероятность попадания ошибок в установленные нормативы.

Спецификация нормативных требований также включает требования к проведению калибровки и проверки приборов ориентации перед их эксплуатацией. В частности, допускается использование эталонных источников солнца с известной направленностью и характеристиками, обеспечивающих установление точных эталонных значений для последующего сравнения. Обязательным является документирование всех этапов испытаний, что обеспечивает прослеживаемость результатов и возможность их повторения в рамках межлабораторных сертификаций.

Достаточность и полнота испытаний определяется не только соответствием приборов стандартам, но и их устойчивостью к внешним воздействиям, таким как вибрации, радиационное воздействие и электромагнитные помехи. В связи с этим нормативные документы требуют проведения комплексных тестов, включающих вибрационные испыта-

ния, радиационную проверку и электромагнитную совместимость (ЭМС). Такие мероприятия позволяют выявить возможные отклонения в работе прибора при условиях, приближенных к реальным, что критично для длительных миссий.

Устройство прототипа солнечного датчика и лабораторного стенда. Устройство лабораторного стенда, предназначенного для тестирования и калибровки разрабатываемого прототипа солнечного датчика (рисунок 3).

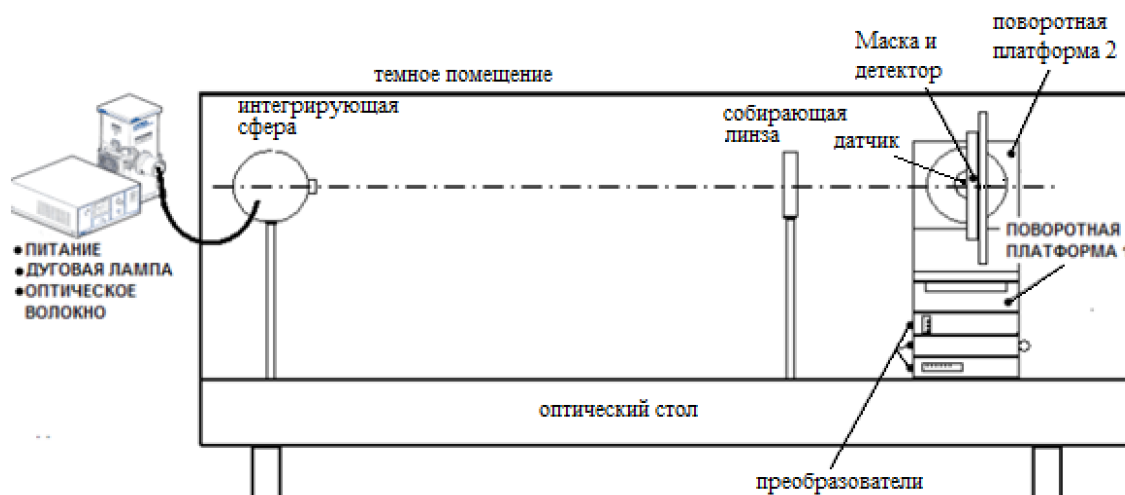


Рис. 3 Схема устройства

Условно стенд можно разделить на две основные части:

- симулятор солнечного излучения, задача которого – максимально правдоподобное воссоздание реальных условий солнечного излучения.
- прототип солнечного датчика, закрепленный на поворотном механизме, имеющий две степени свободы и обеспечивающем микропозиционирование датчика относительно источника Солнца.

Система моделирования солнечного излучения. Основная задача системы моделирования солнечного излучения (СМСИ) – это воссоздание в лабораторных условиях реального солнечного излучения с максимальной точностью. При создании этой системы ставились следующие задачи:

- основная часть спектра излучения источника должна находиться в видимом диапазоне;
- должно симулироваться условие удаленности источника излучения от датчика «на бесконечность»;
- должен симулироваться реальный угловой размер источника (0,520), наблюдаемый с орбиты Земли.

На рисунке 4 представлена схема функционирования СМСИ.

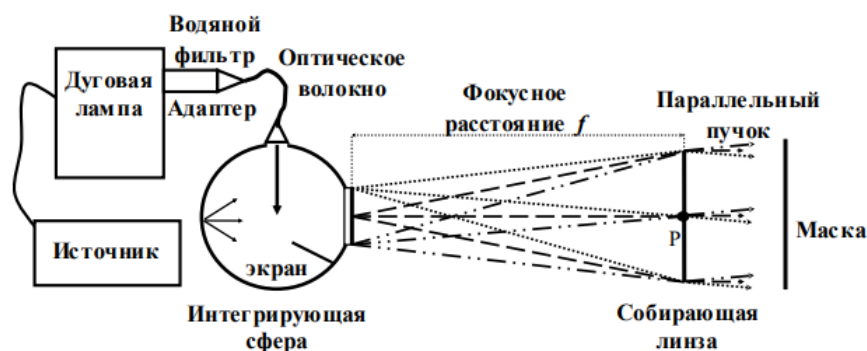


Рис. 4 Схема системы моделирования солнечного излучения

В качестве излучателя используется ксеноновая дуговая лампа мощностью 1000 Вт, запитанная от стабилизированного источника, мощность которого 1200 Вт. Излучение лампы воспроизводит спектр Солнца в диапазоне от 250 до 2500 нм с пиком в 290 нм. Лампа находится в специальном кожухе, оснащенном зеркальным отражателем, который собирает весь поток излучения в пучок диаметром 48 мм. Водяной фильтр вырезает участок инфракрасного спектра выше 1200 нм (сенсоры на основе APS не чувствительны к данному типу излучения). Полученный поток излучения через специальный адаптер передается в интегрирующую сферу по кварцевому оптическому волокну диаметром 3,2 мм. В сфере поток излучения подвергается многократным переотражениям так, что на выходе получается поток рассеянного света. Радиус выходного отверстия интегрирующей сферы $R = 6,82$ мм. Для симуляции бесконечной удаленности источника используется собирающая линза с фокусным расстоянием $f = 1500$ мм. После прохождения линзы получается практически параллельный пучок, а угловой размер источника может быть вычислен по формуле $\theta_s = 2 * \arctg \frac{R}{f} = 0.52^\circ$.

Библиографические ссылки

1. Определение ориентации космического аппарата : сайт. – Москва – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-orientatsii-kosmicheskogo-apparata-v-geotsentricheskoy-ekvatorialnoy-inertsialnoy-sisteme-koordinat-na-osnove> (дата обращения 10.09.2025). – Текст : электронный.
2. Автономный метод определения оценок параметров орбиты и ориентации космического аппарата при отсутствии априорной информации : сайт. – <https://cyberleninka.ru/article/n/avtonomnyy-metod-opredeleniya-otsenok-parametrov-orbity-i-orientatsii-kosmicheskogo-apparata-pri-otsutstvii-apriornoj-informatsii> (дата обращения 15.10.2025). Текст: электронный.
3. Испытание систем ориентации и стабилизации космических аппаратов с применением имитаторов звездного неба : сайт. – Москва – <https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-sistem-orientatsii-i-stabilizatsii-kosmicheskikh-apparatov-s-primeneniem-imitatorov-zvezdnogo-neba/pdf> (дата обращения 5.11.2025). Текст: электронный.

УДК 621.45

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНОГО
ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ**

Б. А. Раменский, А. С. Иванов, Д. П. Рейфшнейдер
Научный руководитель – В. П. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ramenskiybogdan@mail.ru

Аннотация: рассмотрены вопросы модернизации испытательного стенда для огневых испытаний ракетных двигателей малой тяги (РДМТ). Показано, что экспериментальная отработка занимает центральное место в жизненном цикле ракетных двигателей, однако существующая стендовая база зачастую не в полной мере соответствует современным требованиям по точности и информативности измерений. В качестве объекта исследований выступает стенд, расположенный на полигоне «Установо», и опытный образец РДМТ «Факел-1», изготовленный по аддитивной технологии. На основе анализа эксплуатации базовой версии стенда выявлены системные недостатки, а также предложен комплекс технических решений, включающий замену расходомеров. Приведены результаты огневых испытаний, подтвердившие работоспособность двигателя и эффективность выполненных мероприятий. Сделаны выводы о повышении метрологического уровня стенда, достоверности получаемых данных и безопасности проведения экспериментов.

Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, испытательный стенд, модернизация, огневые испытания.

Экспериментальная отработка, или испытания, занимают центральное место в жизненном цикле ракетных двигателей, это фундаментальный комплекс работ по проверке того, насколько полно реализованные технические решения соответствуют проектным параметрам. В процессе создания инновационных ракетных двигателей и организации их промышленного выпуска центральное место занимают стендовые огневые испытания. Именно в ходе них осуществляется проверка обоснованности проектных и технологических решений, производится контроль соответствия параметров рабочего процесса расчетным величинам и дается заключение о работоспособности и надежности готового изделия [3]. Главная задача испытаний – не только подтвердить заявленные характеристики, но и эмпирическое подтверждение надежности и безопасности двигателя при воздействии эксплуатационных нагрузок, что невозможно гарантировать только расчетными методами. Ракетный двигатель малой тяги (РДМТ) как объект испытаний обладает рядом специфических особенностей: работа в импульсных режимах, малые расходы топлива, высокие требования к ресурсу и точности управления [1]. Эти особенности предъявляют повышенные требования к испытательной базе.

Современные тенденции в развитии ракетно-космической техники, включая внедрение аддитивных технологий и многофазовых систем, диктует необходимость совершен-

ствования методов и средств наземной экспериментальной отработки. Существующие стенды зачастую оснащены оборудованием, которое не соответствует современным требуемым задачам, что ограничивает возможность получения полной и достоверной информации о рабочих процессах.

Целью данной работы является повышение метрологического уровня и эксплуатационной надежности стенда для испытаний РДМТ путем внедрения комплекса технических решений.

Объектом исследования выступает испытательный стенд для огневых испытаний РДМТ, расположенный на территории полигона «Установо».

Для проведения цикла экспериментальных работ был спроектирован и изготовлен опытный образец камеры ракетного двигателя малой тяги. Его создание осуществлялось с использованием технологий селективного лазерного сплавления, что позволило интегрировать сложные внутренние каналы и форсуночные элементы непосредственно в конструкцию смесительной головки, отказавшись от традиционных сборочных единиц [1]. Корпус камеры и головка, соединяемые впоследствии аргонодуговой сваркой, образуют цельную конструкцию, оптимизированную для работы на газообразных компонентах.

В качестве топливной пары выбраны экологически безопасные и технологичные компоненты: газообразный кислород (окислитель) и газообразный метан (горючее).

Двигатель-демонстратор функционирует на экологически безопасных газообразных компонентах топлива, в качестве которых выступают кислород (окислитель) и метан (горючее), поступающие в камеру сгорания при температуре 298 К. Основные расчетные параметры двигателя включают номинальную тягу 200 Н при давлении в камере сгорания 1,0 МПа и давлении на срезе сопла 0,00085 МПа. Массовый расход окислителя составляет 0,04316 кг/с, горючего – 0,02439 кг/с, что в совокупности обеспечивает расчетный удельный импульс 2960 м/с.

Экспериментальная отработка опытного изделия, получившего наименование «Факел-1», проводилась на специализированном стендовом оборудовании. Программа испытаний включала пять последовательных запусков длительностью 1,5 секунды каждый, разделенных интервалами продувки магистралей. Во всех циклах наблюдалось стабильное воспламенение и устойчивое горение топливной смеси, о чем свидетельствовало формирование четкого факела на срезе сопла. По окончании подачи компонентов зафиксирована мгновенная и чистая отсечка пламени. Зафиксированные значения тяги оказались близки к проектным (около 200 Н). Отклонения объясняются тем, что при пониженном давлении на входе сопло работало в режиме перерасширения, поскольку атмосферное давление (примерно 0,1 МПа) многократно превышало расчетное давление на срезе [1].

Тот факт, что в ходе испытаний не было зафиксировано критических дефектов, а работа двигателя протекала устойчиво, свидетельствует о правильности принятых конструкторских решений. Вместе с тем, успешное проведение эксперимента стало возможным благодаря тому, что двигатель функционировал в строго контролируемых условиях, которые обеспечиваются инфраструктурой стенда. Проведение огневых испытаний требует уникальной и высокотехнологичной инфраструктуры, представляющей собой сложный инженерный комплекс.

Система подачи компонентов топлива отвечает за своевременную и дозированную подачу горючего и окислителя в камеру сгорания. Для предотвращения искрообразования и герметичности, система разделена на два независимых тракта. Компонировка системы включает стандартный для подобных стендов набор: аккумулятор давления (баллоны с газообразным O_2 и CH_4), подводящие магистрали из коррозионно-стойкой стали и редукционное оборудование для точной настройки давления подачи.

Испытательная стойка является ключевым несущим элементом стенда, выполняя функцию силовой платформы для монтажа объекта испытаний. Конструкция стойки проектировалась с учетом требований по обеспечению требуемой жесткости и вибро-

устойчивости, что необходимо для корректной работы тензометрической системы измерения тяги и предотвращения неблагоприятных колебаний. Стойка оснащена крепежными элементами, гарантирующими надежную фиксацию двигателя при воздействии полетных нагрузок, включая тягу.

Системы зажигания предназначена для инициирования процесса горения топливной смеси камеры сгорания. Ее основу составляют блок электропитания и специализированная свеча зажигания модели 6213 NGK SILMAR9A9S, которая обеспечивает стабильное и надежное воспламенение в широком диапазоне рабочих условий [1].

Центральное место в структуре стенда отведено системе измерений, поскольку именно качество регистрируемых параметров определяет объективность выводов о работоспособности двигателя. Система обеспечивает непрерывный мониторинг ключевых показателей в реальном времени. К числу контролируемых величин относятся усилие тяги, измеряемое силоизмерительной платформой, давление в различных точках газового тракта, а также мгновенные и суммарные расходы компонентов топлива. Совокупность этих данных позволяет не только оценить соответствие двигателя проектных характеристик, но и выявить возможные отклонения в работе его системы на ранних стадиях.

В ходе анализа эксплуатации базовой версии стенда был выявлен ряд системных проблем, снижающих качество испытаний.

Низкая точность измерения расхода топлива не позволяло с необходимой точностью определять массовый расход компонентов, что критически сказывалось на достоверности вычисления удельного импульса – ключевого показателя эффективности РДМТ.

Отсутствие оперативного контроля температурного поля камеры сгорания. Существующая система не давала возможности в реальном времени отслеживать динамику нагрева и выявлять локальные зоны перегрева на внешней поверхности камеры, что важно для верификации тепловых расчетов и оценки состояния теплозащитных покрытий.

В процессе динамических испытаний (запуск, остановка, импульсные режимы) наблюдалось касание гибких рукавов высокого давления о кромки монтажных отверстий силовой плиты. Это создавало риск повреждения магистралей и искажения показаний силоизмерительного устройства.

Недостаточный контроль входных параметров топлива, а именно отсутствие непрерывного контроля температуры компонентов топлива на входе в двигатель не позволяло вносить точные поправки в расчеты и обеспечивать стабильность условий эксперимента.

Следует отметить, что применяемые методики проведения испытаний и используемое стендовое оборудование в своей совокупности должны гарантировать получение результатов с требуемыми точностными характеристиками, а также обеспечивать воспроизведение необходимых режимов и условий испытаний с нормированной точностью. Несответствие существующей испытательной базы данным требованиям обусловило необходимость проведения комплекса мероприятий по ее модернизации [2].

Для устранения выявленных недостатков был разработан и реализован комплекс мероприятий по реализации стенда. Предлагаемые решения предполагали комплексный подход к повышению информативности испытаний, сочетающем как замену измерительного оборудования, так и конструктивную доработку механических узлов стенда.

Одним из ключевых направлений модернизации испытательного стенда стало обновление системы измерения расхода компонентов топлива. Расходомеры предыдущего поколения, ранее установленные на магистралях подачи, были заменены на современные высокочастотные аналоги. Внедренные расходомеры имели верхний предел измерений $Q_{\max} = 6000$ л/мин. Основная приведенная погрешность γ новых приборов составила $\pm 3\%$, что в абсолютном выражении соответствует пределу допускаемой погрешности $\Delta = \pm 0,03 \cdot Q_{\max} = \pm 180$ л/мин. Применяемые ранее расходомеры имели класс точности 4, что соответствовало $\Delta = \pm 240$ л/мин. Снижение абсолютной погрешности измерений

расхода на 60 л/мин позволило повысить достоверность определения удельного импульса и массового расхода компонентов топлива.

Данное решение позволило перейти от косвенных методов оценки к прямому и максимально достоверному измерению массового расходомера окислителя и горючего. Следует особо подчеркнуть, что точность измерения данного параметра имеет принципиальное значение, поскольку именно на его основе впоследствии рассчитывается удельный импульс – один из главных показателей, характеризующий энергетическую эффективность и совершенство рабочего процесса ракетного двигателя малой тяги.

Вторым этапом модернизации стенда стала реализация системы оперативного контроля температурного поля на внешней поверхности камеры сгорания. Ранее штатные средства стенда не позволяли в полной мере регистрировать динамику изменения температур в ходе огневого эксперимента, что ограничивало возможности верификации тепловых моделей и анализа переходных процессов.

Для решения данной задачи в состав контрольно-измерительной аппаратуры были введены портативные цифровые термометры модели Lpocluc TM-902C, укомплектованные выносными термопарами типа К (хромель-алюмель). Анализ технической документации данных средств измерений подтверждает их соответствие требованиям эксперимента. Основная приведенная погрешность приборов дифференцирована по диапазонам: в зоне рабочих температур от 0 до 500 °С она составляет $\pm(0,75\% + 1^\circ\text{C})$, а в диапазоне от 500 до 750 °С – $\pm(1\% + 1^\circ\text{C})$. Разрешение измерений составляет 1°С, что в совокупности с заявленным уровнем точности обеспечило достоверную регистрацию динамики нагрева.

Применение термометров Lpocluc TM-902C обусловлено двумя их ключевыми особенностями. Во-первых, высокая частота дискретизации сигнала и малое время обновления показаний (до нескольких отсчетов в секунду) позволили фиксировать изменение температуры в реальном времени. Это дало возможность наблюдать динамику нагрева и охлаждения контролируемых зон, что имеет определяющее значение при анализе переходных процессов запуска и останова двигателя, характеризующихся наибольшей скоростью изменения теплового состояния. Во-вторых, наличие в приборе функции автоматического удержания пикового значения (Hold) обеспечило регистрацию максимальной температуры, достигнутой в каждой контрольной точке за время испытательного цикла. Полученные пиковые значения впоследствии использовались для оценки фактических термических нагрузок на элементы конструкции и верификации проектных тепловых расчетов.

Зарегистрированные температурные данные позволяют решить ряд прикладных задач. В частности, определить оценку равномерности прогрева камеры сгорания по длине и окружности. Анализ температурных полей выявляет локальные зоны перегрева, наличие которых может свидетельствовать о скрытых дефектах внутреннего теплозащитного покрытия либо о нарушениях штатного режима охлаждения стенки камеры.

Таким образом, применение портативных термометров Lpocluc TM-902C для контроля внешней температуры камеры сгорания обеспечивает получение экспериментальных данных, характеризующих тепловое состояние двигателя в ходе огневых испытаний. Таким образом повышается информативность экспериментальной отработки и понимание протекающих тепловых процессов.

Установлено, что соединительные узлы и гибкие рукава высокого давления (РВД) в динамике рабочих процессов вступали в контакт с кромками монтажных отверстий, выполненных в теле плиты.

Для устранения данного недостатка была проведена механическая доработка проблемных зон. С использованием фрезерного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) выполнено расширение и изменение геометрии отверстий для пропуска топливных магистралей. Применение ЧПУ-обработки позволило отверстиям фор-

му, оптимизированную с учетом реальных траекторий возможного смещения рукавов в процессе работы. В результате доработки на всех этапах испытательного цикла был обеспечен гарантированный зазор между магистралями и краями отверстий, что позволило исключить риск их механического контакта.

Дополнительным направлением модернизации является оснащение магистралей подачи окислителя и горючего штатными термометрами. Данное усовершенствование позволило организовать непрерывный контроль температуры компонентов топлива непосредственно на входе в двигатель. Реализация этой меры обеспечила соблюдение требований технических условий в части допустимого температурного диапазона подаваемых компонентов. Кроме того, наличие достоверных данных о фактической температуре окислителя и горючего дало возможность вносить необходимые корректирующие поправки при расчете текущих параметров и последующей обработке результатов измерений.

В результате выполнения представленной работы проведен комплексный анализ существующих проблем испытательного стенда для РДМТ, разработаны и внедрены технические решения, направленные на повышение его метрологического уровня, и надежности стенда. В ходе анализа эксплуатации базовой версии стенда были выявлены системные недостатки.

Для устранения выявленных проблем реализован комплекс мероприятий по модернизации. С целью повышения точности произведена замена расходомеров предыдущего поколения, с основной приведенной погрешностью $\gamma = \pm 4\%$ на современные аналоги с приведенной погрешностью $\gamma = \pm 3\%$. Снижение абсолютной погрешности измерений расхода на 60 л/мин обеспечило повышение достоверности определения удельного импульса и массового расхода. Решена проблема отслеживания, в реальном времени динамики нагрева камеры сгорания, с помощью портативных цифровых термометров. Что обеспечило измерение температуры с разрешением 1°C и основной погрешностью, не превышающей $\pm(0,75\% + 1^\circ\text{C})$ в диапазоне до 500°C . Выполнена механическая доработка силовой плиты и оснащены магистрали подачи компонентов топлива штатными термометрами.

Экспериментальная апробация модернизированного стенда проведена в ходе огневых испытаний опытного образца РДМТ «Факел-1».

Совокупный эффект от реализованных мероприятий выражается в повышении точности измерений, расширении номенклатуры контролируемых параметров, обеспечении воспроизводимости условий экспериментов и повышении безопасности испытательного процесса. Полученные результаты открывают новые возможности для углубленного анализа экспериментальных данных и выдачи обоснованных заключений при испытаниях двигателей.

Библиографические ссылки

1. Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 682-696.

2. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги / В. П. Назаров, В. Ю. Пиунов, В. Г. Яцуненко, Д. А. Савчин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 339–354.

3. Яцуненко В. Г., Назаров В. П., Коломенцев А. И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 248 с.

© Раменский Б. А., Иванов А. С., Рейфшнейдер Д. П., 2026

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Н. В. Бекшаев

Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nekich02@mail.ru

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа основных методов вибрационных испытаний для контроля качества элементов жидкостных ракетных двигателей.

Ключевые слова: вибрационные испытания, жидкостный ракетный двигатель.

Вибрационное испытание представляет собой неразрушающий метод оценки целостности и рабочих характеристик компонентов ЖРД, в частности лопаток турбин. Метод основан на возбуждении испытуемого объекта на собственных резонансных частотах и измерении отклика на эти возбуждения.

Принцип вибрационного метода заключается в анализе реакции объекта на внешние механические колебания контролируемой частоты и амплитуды. Измеряемые динамические характеристики включают частоты собственных колебаний, коэффициенты затухания и формы колебаний.

Классификация методов вибрационных испытаний:

1. Синусоидальные вибрационные испытания

Принцип: Воздействие на образец синусоидальными колебаниями с заданной частотой и амплитудой для имитации эксплуатационных условий.

Основные параметры:

- Частотный диапазон: от нескольких герц до нескольких килогерц
- Амплитуда: определяется требованиями испытаний и характеристиками изделия
- Продолжительность воздействия

Оборудование: Вибростенды с прецизионным управлением параметрами, акселерометры, лазерные виброметры.

Результаты: Регистрируемые данные формируют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) или частотную передаточную функцию. Пики на графиках указывают на резонансные частоты конструкции.

Применение: Идентификация собственных частот, ранние стадии разработки, испытания компонентов с известными рабочими частотами.

2. Случайные вибрационные испытания

Принцип: Применение случайных сигналов для моделирования непредсказуемых эксплуатационных условий с изменяющейся частотой и амплитудой.

Характеристики: Вибрации описываются спектром мощности, определяющим распределение энергии по частотам.

Параметры:

- Уровень спектральной плотности мощности
- Частотный диапазон
- Длительность испытаний

Цели: Оценка прочности при случайных нагрузках, выявление конструктивных недостатков, оценка долговечности в реальных условиях.

Применение: Квалификационные испытания авиакосмической техники, где преобладают случайные вибрации.

3. Модальные испытания

Принцип: Определение динамических характеристик структур через возбуждение внешними силами (ударом или вибрацией) и измерение ответной реакции.

Модальные параметры:

- Частоты собственных колебаний
- Формы колебаний (геометрическое распределение деформаций)
- Коэффициенты затухания

Методы возбуждения:

- Ударный метод
- Вибрационный метод
- Лазерная интерферометрия

Оборудование: Акселерометры, микрофоны, высокоскоростные камеры, лазерные системы.

Применение: Анализ сложных конструкций, валидация проектных решений, улучшение демпфирующих свойств.

4. Вибрационные испытания на усталость

Принцип: Оценка прочности и долговечности под воздействием циклических вибрационных нагрузок.

Типы нагружения:

- Синусоидальные испытания с постоянной частотой и амплитудой
- Случайные вибрации для моделирования реальных условий
- Ударные испытания для проверки устойчивости к импульсным воздействиям

Цели:

- Определение предела усталости материала
- Оценка времени до разрушения
- Выявление слабых мест конструкции

Применение: Определение срока службы изделий, подвергающихся постоянной вибрации.

5. Акустические вибрационные испытания

Принцип: Возбуждение объекта звуковыми волнами высокой интенсивности и анализ реакции через микрофоны, акселерометры и датчики.

Методы:

- Акустическая эмиссия: регистрация звуковых волн при механических деформациях
- Лазерная акустика: высокоточное возбуждение и измерение
- Импульсный метод: анализ отклика на короткий звуковой импульс

Цели:

- Определение модальных параметров
- Выявление резонансных частот
- Оценка акустических свойств (звукопоглощение, звукоизоляция)

Применение: Компоненты ракетно-космической техники, подвергающиеся воздействию интенсивного шума при запуске и работе двигателей.

Преимущества вибрационного метода:

- Неразрушающий характер испытаний
- Выявление скрытых повреждений, невидимых при визуальном осмотре
- Быстрота и эффективность для массового тестирования
- Возможность автоматизации процесса
- Прогнозирование поведения в реальных условиях эксплуатации
- Применимость к различным материалам (металлы, композиты)

Ограничения:

- Необходимость специализированного оборудования и квалифицированного персонала
- Сложность интерпретации результатов в некоторых случаях
- Возможность пропуска отдельных типов повреждений (поверхностные трещины)

Таблица 1.

Сравнительные характеристики типов вибрационных испытаний

Тип	Характер воздействия	Основное назначение	Применение
Синусоидальные	Предсказуемая линейная вибрация с фиксированной частотой	Идентификация резонансных частот	Ранние этапы разработки
Случайные	Нерегулярный сигнал всех частот диапазона	Моделирование реальных условий	Квалификационные испытания
Модальные	Возбуждение для анализа динамики	Детальный анализ форм колебаний	Сложные конструкции
На усталость	Длительная циклическая нагрузка	Определение срока службы	Продукция с постоянной вибрацией
Акустические	Высокоинтенсивное акустическое поле	Оценка стойкости к шуму	Ракетно-космическая техника

Методика проведения испытаний:

Процедура:

5. Подготовка: закрепление объекта в приспособлении, обеспечивающем требуемые граничные условия

6. Возбуждение: приложение переменной силы через электродинамический вибратор или электромагнит (рис. 1)

7. Измерение отклика: регистрация вибрации датчиками на поверхности или вблизи объекта

8. Анализ данных: определение резонансных частот, форм колебаний и коэффициентов затухания

Интерпретация результатов:

- Резонансные частоты характеризуют жесткость и массу; их снижение указывает на потерю жесткости (трещины)
- Формы колебаний выявляют повреждения или ослабленные участки
- Коэффициенты затухания отражают рассеяние энергии; увеличение указывает на наличие трения или демпфирования

В состав виброустановки входят: вибростенд (вибровозбудитель) 4, преобразующий энергию любого вида в энергию механических колебаний (в вибрацию); генератор 2 воздействующих сигналов, создающий управляющее воздействие на вибростенд, соответствующее данному характеру вибрации и режиму испытаний; усилитель мощности 3, предназначенный для получения требуемого значения вынуждающей силы.

В конструкцию вибростенда входит как неподвижная часть, и подвижная система, совершающая вибрационное движение. Устойчивое равновесие и ориентацию подвижной системы относительно неподвижной части обеспечивает система подвески. Испытуемое

изделие устанавливается и закрепляется для передачи ему вибрации на конструктивной части подвижной системы, называемой вибростолом 5.

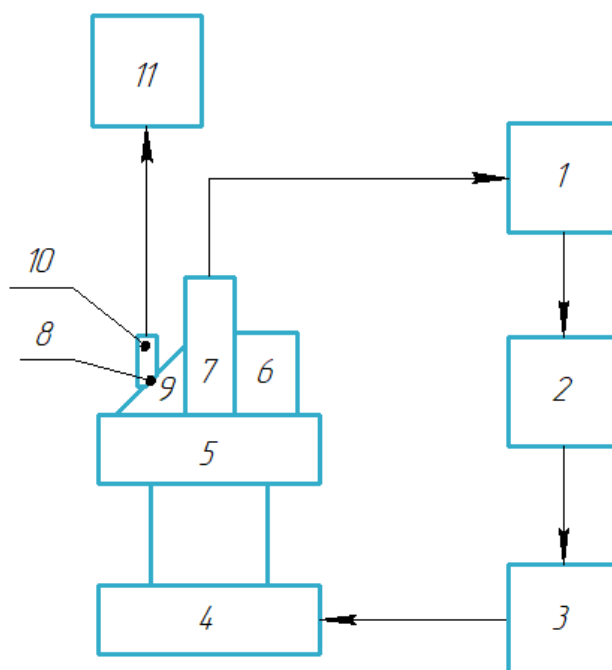


Рис. 1. Схема установки для вибрационных испытаний

1 – система управления; 2 – генератор воздействующих усилий; 3 – усилитель мощности; 4 – вибровозбудитель; 5 – вибростол; 6 – контрольный датчик; 7 – контрольная точка; 8 – точка крепления регистрирующего датчика; 9 – испытываемое изделие; 10 – датчи, закрепляемый на изделии; 11 – средство регистрации параметров вибрации

Различают две основные точки: контрольную и измерительную. Контрольная точка 6 располагается в том месте, относительно которого должно проводиться измерение значений параметров вибрации испытываемого изделия (на столе вибростенда, на приспособлении, на самом изделии), причем она должна находиться как можно ближе к одной из точек крепления и быть с ней жестко связанной. Сигнал с ВИП (виброизмерительный преобразователь) 7, расположенного в контрольной точке, используется в системе управления 1, обеспечивающей поддержание значений параметров вибрации на определенном уровне.

Измерительная точка 8 располагается в том месте испытываемого изделия 9, где значения параметров вибрации определяют исход испытаний. В точку 8 помещают ВИП 10, сигнал с которого подводится к средствам измерения, анализа и обработки полученных данных 11. Таким образом, результаты испытаний оцениваются значениями параметров вибрации, полученными в измерительной точке при условии обеспечения заданных значений в контрольной точке.

Вибрационные методы испытаний являются неотъемлемым элементом обеспечения качества и надёжности компонентов ЖРД. Комплексное применение различных методов позволяет:

- Точно определить собственные частоты колебаний, формы мод и демпфирующие свойства
- Выявить потенциально опасные резонансные режимы работы
- Оценить усталостную прочность и допустимые нагрузки
- Валидировать теоретические модели и расчеты
- Улучшить конструкцию на основе экспериментальных данных

- Обеспечить безопасность и надежность на протяжении срока службы

Вибрационные методы минимизируют риск аварий и дорогостоящих ремонтов, гарантируя бесперебойную работу сложных и ответственных систем ракетно-космической техники.

Библиографические ссылки

1. Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н., Стадников А.Н. и др. Экспериментально-расчетные исследования эффективности различных способов демпфирования колебаний деталей газотурбинных двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2015. Т. 14. № 3-1. С. 171-182.

2. Ножницкий Ю.А., Балувев Б.А., Федина Ю.А. Экспериментальные исследования прочностной надежности перспективных газотурбинных двигателей // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19. № 3(69). С. 3-14.

3. Данилкин С.Ю., Шкуров В.В., Мазикина Т.И. и др. Развитие методов исследования колебаний лопаток рабочих колес турбомашин при стендовых испытаниях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23. № 2(84). С. 17-25.

4. Патент РФ № 2673950 С1. Способ определения форм колебаний вращающихся колес турбомашин / Селезнев В.Г., Головченко И.Ю.; заявл. 19.01.2018; опубл. 03.12.2018.

5. Боришанский К.Н., Григорьев Б.Е., Григорьев С.Ю. и др. Методика непрерывного контроля вибрационного состояния рабочих лопаток турбомашин // Теплоэнергетика. 2000. № 5. С. 46-51.

6. ГОСТ 30630.1.2-99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 26 с.

© Бекшаев Н. В., 2026

CFD-АНАЛИЗ И ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА СО СМЕННЫМИ ПОЛУОТКРЫТЫМИ КОЛЁСАМИ

Р. Р. Файзуллин, В. В. Черненко, М. В. Матвеев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: ryslanfaizullin@yandex.ru

В работе рассматривается разработка центробежного насоса для исследования гидродинамических характеристик в зависимости от геометрических параметров полуоткрытых рабочих колёс. Основное внимание уделено разработке, обеспечивающей лёгкость смены рабочих колёс. Представлены этапы проектирования, включающие проектирование и создание трёхмерной модели, изготовление изделия и проведения испытаний.

Ключевые слова: Центробежный насос, рабочие колесо, численное моделирование.

Насосы являются неотъемлемыми элементами ракетно-космической техники, обеспечивая работоспособность систем подачи топлива и терморегулирования. От их надёжности и выходных параметров (расхода, напора и других) напрямую зависит успешное выполнение полетных заданий. В связи с этим особую важность приобретает этап проектирования и, главным образом, экспериментальной отработки насосных агрегатов.

Для проведения подобных исследований был спроектирован и изготовлен центробежный насос, предназначенный для изучения гидродинамических характеристик. Ключевой особенностью разработанной конструкции является возможность быстрой смены рабочих колёс, что позволяет экспериментально оценить влияние их геометрических параметров (в частности, полуоткрытого типа) на эффективность работы насоса.

Проектирование центробежного насоса выполнялось по методике [1]. Исходные данные для расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Частота вращения	2900 об/мин
Плотность жидкости	1000 кг/м ³
Объемный расход	3*10 ⁻⁴ м ³ /с
Напор	3 м
Предварительный диаметр вала	10 мм
Касательное напряжение вала	15*10 ⁶ Па.
Толщина лопаток	2.5 мм

На основе исходных данных были определены основные размеры насоса (таблица 2) и рабочего колеса (таблица 3).

Для обеспечения оперативной смены рабочих колёс в процессе экспериментальных исследований в конструкции корпуса предусмотрена резьбовая крышка со стороны всасывания. Это позволяет заменять крыльчатку без полной разборки насоса, что существенно сокращает временные затраты.

Габаритные и присоединительные размеры насоса

Параметр	Значение
Диаметр на входе/выходе	20 мм
Габаритные размеры	166 мм*156 мм*140 мм
Начальный радиус улитки	40 мм
Выходной радиус улитки	60 мм
Длина входного патрука	140 мм
Длина выходного патрука	120 мм

Геометрические параметры рабочего колеса (полуоткрытого типа)

Параметр	Значение
Диаметр колеса	60 мм
Ширина лопастей на входе/выходе	2,5/6,0 мм
Высота лопаток	10 мм
Ступица колеса	18 мм
Длина ступицы	15 мм
Число лопаток	6
Входной угол	45°
Выходной угол	18°

По полученным размерам в среде САПР была создана трёхмерная модель проточной части насоса (рис. 1). Модель импортирована в среду конечно-элементного анализа для решения гидродинамической задачи методом конечных объёмов [2].

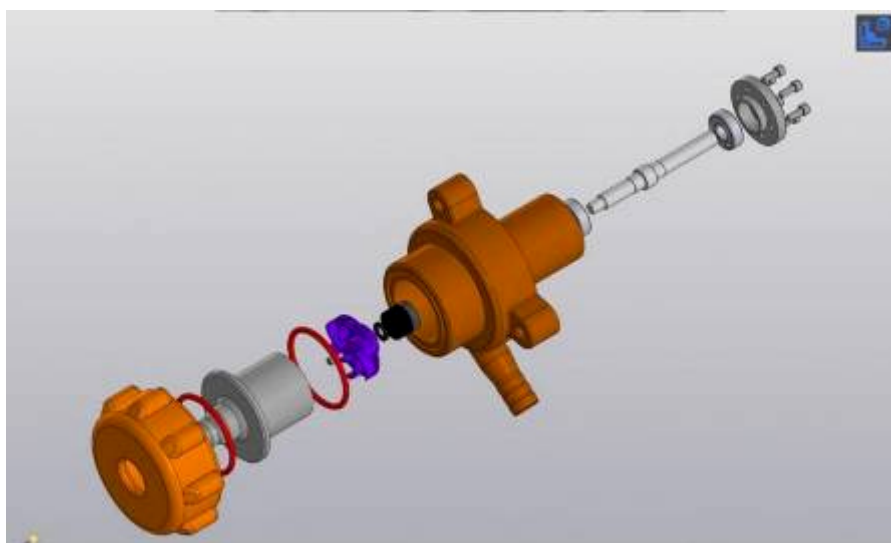


Рис. 1. Трёхмерная разнесённая модель насоса

Граничные условия заданы следующим образом:

- на входе – атмосферное давление $p_{вх}=101325$ Па;
- на выходе – значения скорости потока: 0,1; 0,5; 1; 3; 5; 7 м/с (что соответствует изменению расхода);
- рабочее колесо вращается с частотой 2900 об/мин;
- температура несжимаемой среды 20 °С;
- плотность несжимаемой среды 1000 кг/м³;
- динамическая вязкость 0,001 Па*с.

Расчётная сетка была построена в используемом программном комплексе. Модель включала 62 886 конечных элементов, из которых 40 627 тетраэдров, 17 906 призм и 4 353 пирамидальных элементов, с общим числом узлов 19383. Для аппроксимации использовались квадратичные элементы. Качество сетки оценивалось по критерию скошенности (skewness): минимальное значение составило $1.22 \cdot 10^{-4}$, среднее – 0.587, что свидетельствует о приемлемом качестве расчётной сетки для решения задач гидродинамики.

В результате моделирования получена напорно-расходная характеристика насоса (рис. 2) и зависимость мощности от расхода (рис. 3).



Рис. 2. Напорно-расходная характеристика

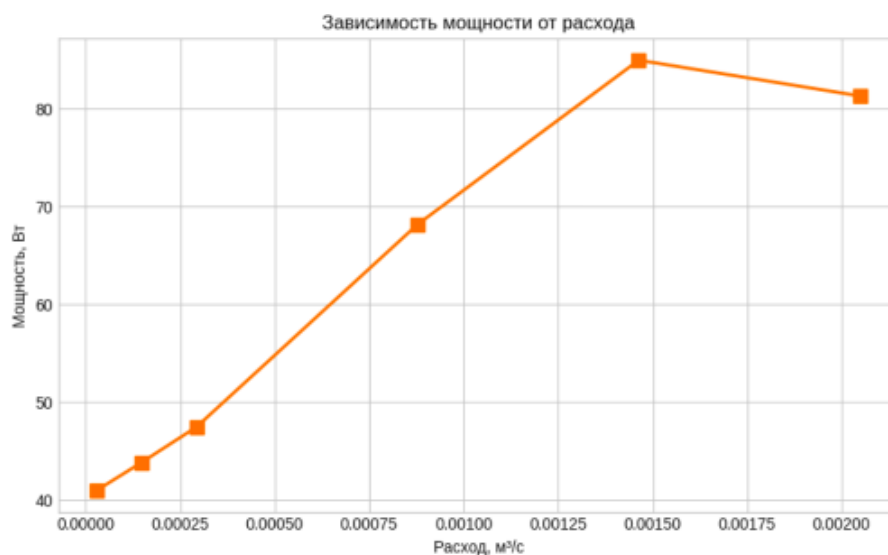


Рис. 3. Зависимость мощности от расхода

В результате моделирования получена напорно-расходная характеристика насоса (рисунок 2) и зависимость мощности от расхода (рис. 3). Зависимость гидравлического КПД от расхода представлена на рисунке 4. На рисунке 4 видно, что гидравлический КПД насоса возрастает с увеличением расхода, достигает максимума около 54 % при расходе $\approx 8,8 \cdot 10^{-4}$ м³/с, после чего резко снижается из-за роста гидравлических потерь. Распределения скорости и давления по длине лопатки для различных режимов работы показаны на рисунках 5 и 6 соответственно. Из рисунка 5 следует, что скорость потока

вдоль лопатки монотонно возрастает от входа к выходу, причём для больших расходов градиент скорости увеличивается, что свидетельствует о более интенсивном разгоне жидкости.

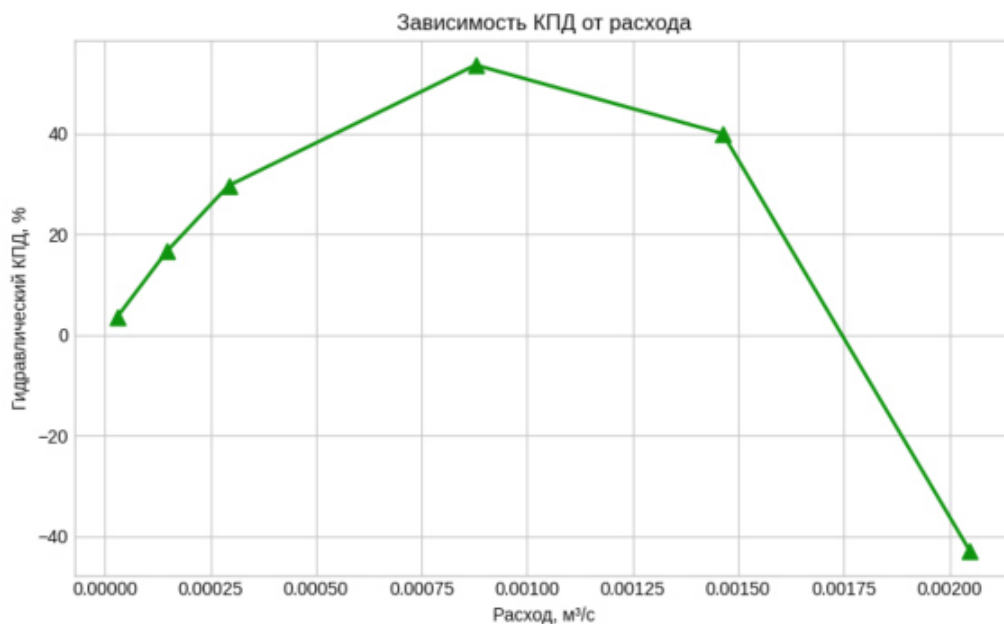


Рис. 4. Зависимость КПД от расхода

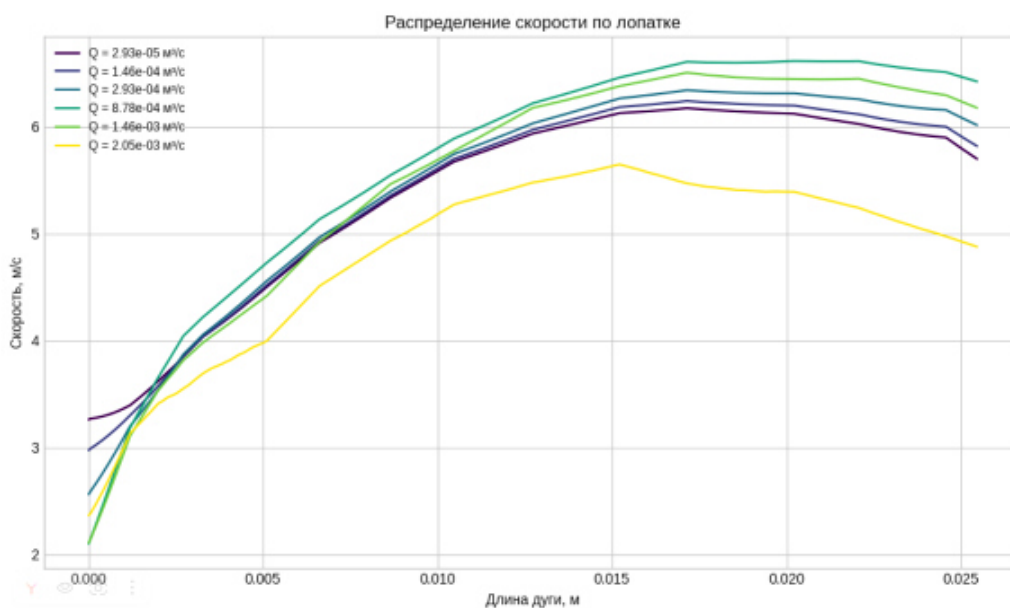


Рис. 5. Распределение скорости по лопатке

На рисунке 6 представлено распределение статического давления. Характер кривых типичен для центробежных насосов: давление минимально на входной кромке и возрастает к выходу, при этом с ростом расхода перепад давления уменьшается. Сравнение расчётной и экспериментальной расходно-напорных характеристик показано на рисунке 7.

Корпусные детали и рабочие колёса изготовлены методом послойного наплавления (FDM) на 3D-принтере Creality K1. В качестве основного материала использован PLA-пластик. Для формирования поддержек при печати сложных внутренних полостей кор-

пуса применён растворимый PVA-пластик. После завершения печати поддержки удалены путём выдержки детали в воде [3-4].

Все элементы насоса (корпус, крышка, задняя крышка, подвод, рабочие колёса) напечатаны со 100% заполнением для обеспечения герметичности и прочности. Фотография изготовленных деталей представлена на рисунке 8.

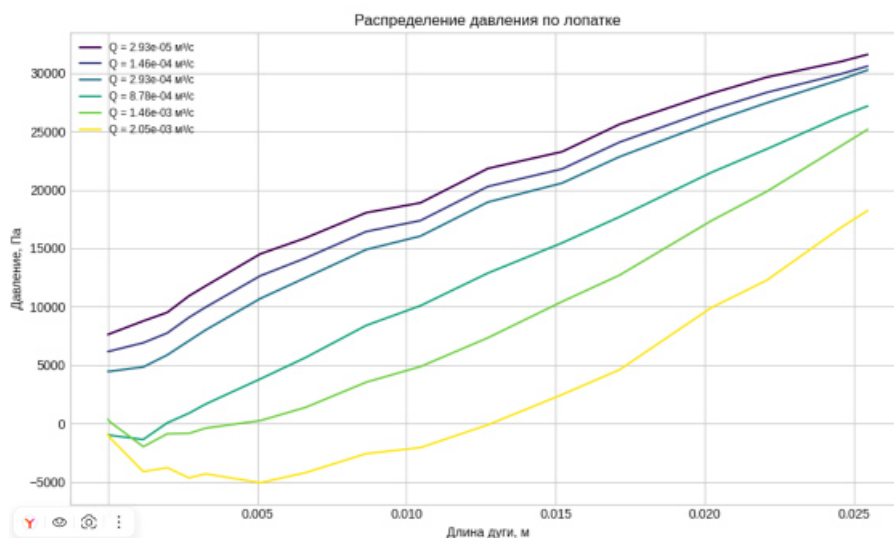


Рис. 6. Распределение давления по лопатке

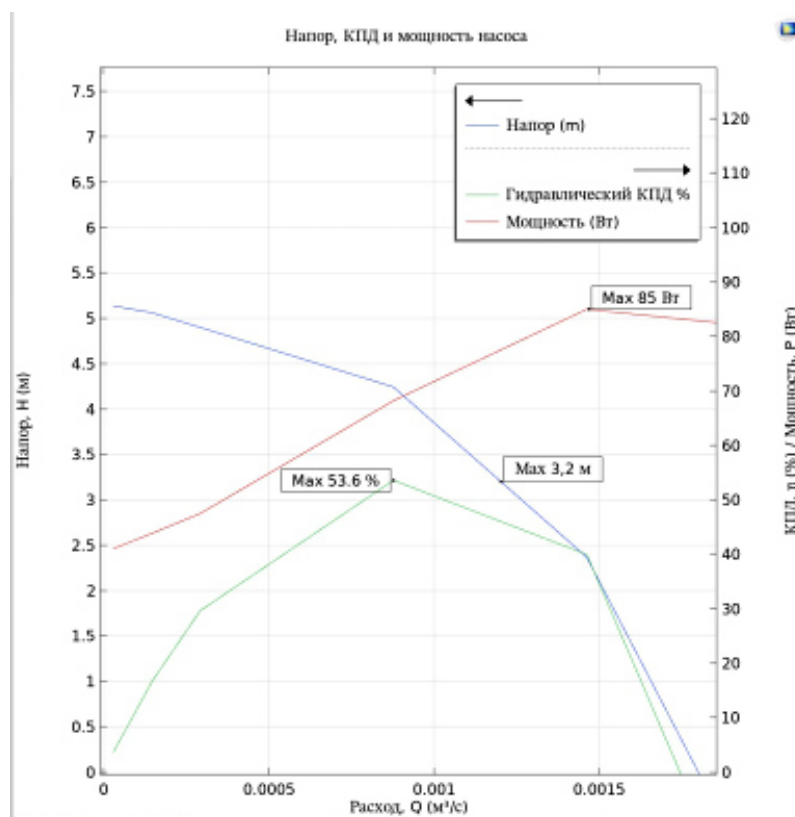


Рис. 7. Сравнение расчётной и экспериментальной расходно-напорных характеристик



Рис. 8. Насос, изготовленный методом FDM-печати

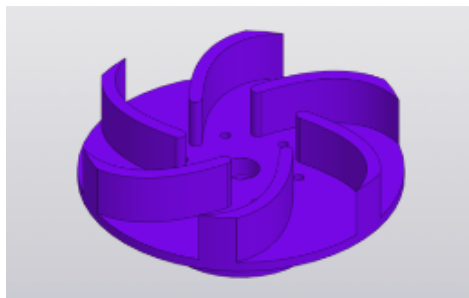


Рис. 9. 3D-модель рабочего колеса

Собранный насос испытан на стенде, включающем манометр (класс точности 2,5) и расходомер. Схема стенда показана на рисунке 10 [5].

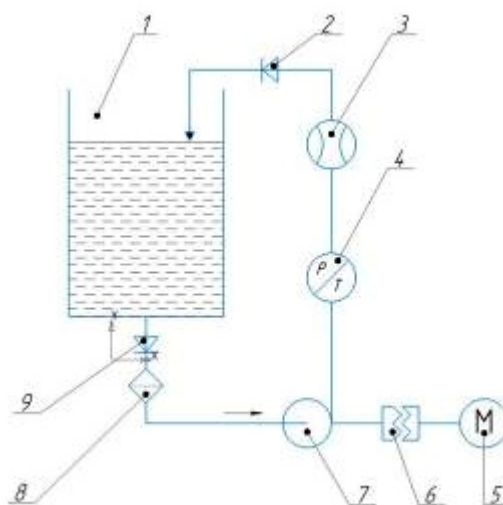


Рис. 10. Схема экспериментальной установки
 1 – бак; 2,9 – вентиль; 8 – фильтр; 7 – центробежный насос;
 6 – упругая муфта; 5 – электродвигатель; 4 – манометр; 3 – расходомер

При полностью закрытом выходном вентиле манометр зафиксировал давление 50406 Па, что соответствует напору $H \approx 5,138$ м при нулевом расходе.

Расходомер показал значение при открытом выходном вентиле 35 л/мин, экспериментальный напор составляет 3,06 м.

Полученные экспериментальные точки нанесены на расчётный график (рисунок 7 – обозначены маркерами). Видно удовлетворительное совпадение: расчётный напор при близком расходе составляет около 3 м. Расхождение может быть связано с упрощениями численной модели (не учтены зазоры, шероховатость поверхностей) и погрешностью

измерений (Манометр класса 2,5 имеет приведённую погрешность до 2,5 % от верхнего предела измерений, как и расходомер, у которого погрешность также нормируется в процентах от диапазона измерений).

Разработанная конструкция с резьбовой крышкой обеспечивает быструю смену рабочих колёс, а применение FDM-печати подтвердило эффективность аддитивных технологий для прототипирования насосов [6].

Таким образом, в ходе выполнения работы создан экспериментальный образец центробежного насоса, пригодный для проведения дальнейших исследований влияния геометрических параметров рабочих колёс на гидродинамические характеристики. Перспективным направлением дальнейших исследований является изготовление серии рабочих колёс с варьируемыми углами установки лопаток и шириной каналов с целью оптимизации напорных и расходных характеристик насоса. Верификация модели показала, что расчётный максимальный напор (3,2 м) отклоняется от экспериментального (3,06 м) не более чем на 5%, что подтверждает адекватность модели в области малых расходов. Отклонение при ненулевом расходе требует дальнейшего уточнения граничных условий и сетки.

Библиографические ссылки

1. Краев М. В., Лукин В. А., Овсянников Б.В. Малорасходные насосы авиационных и космических систем. – Москва: Машиностроение, 1985. – 128 с.

2. Файзуллин, Р. Р. Инженерный анализ тангенциальных лопаток полуоткрытого рабочего колеса центробежного нагнетателя в несжимаемой среде / Р. Р. Файзуллин, М. В. Матвеев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики и 10-летию науки и технологий. В 3-х томах, Красноярск, 07–11 апреля 2025 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2025. – С. 293-295.

3. Анализ возможностей применения аддитивных технологий при производстве элементов центробежных насосов силовых установок / М. О. Панькин, А. Ю. Усс, А. В. Степанов, А. С. Филимонов // XLVIII Академические чтения по космонавтике : сборник тезисов, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2024 года. – Москва: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", 2024. – С. 76-78.

4. Михеенко, Д. Ю. Расходные материалы для 3D печати методом послойного наплавления (FDM/FFF) / Д. Ю. Михеенко, В. М. Михеенко // Знание. – 2016. – № 11-1(40). – С. 37-43.

5. Разработка стенда проведения гидродинамических испытаний малорасходного центробежного насоса / В. В. Черненко, Д. В. Черненко, А. А. Зуев, Р. Р. Файзуллин // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2025. – Т. 26, № 4. – С. 574-584. – DOI 10.31772/2712-8970-2025-26-4-574-584. – EDN HVSAWO.

6. Петров, А. И. Возможные пути применения аддитивных технологий в области насосостроения / А. И. Петров, Е. М. Конькеев, Д. С. Коньшин // Гидравлика. – 2022. – № 13. – С. 98-114.

© Файзуллин Р. Р., Черненко В. В., Матвеев М. В., 2026

ПРОБЛЕМА ЧЕЛОВЕКО-ЦЕНТРИЧНОГО ПОДХОДА К ПРОВЕДЕНИЮ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. В. Сбитнев^{1,2}, М. Г. Поляк¹

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, зд. 52

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: sbitnevdv@iss-reshetnev.ru, polyakmg@iss-reshetnev.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы существующего человеко-центрированного подхода к наземной экспериментальной отработке (НЭО) бортовой аппаратуры командно-измерительных комплексов (БА КИК) космических аппаратов. Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления ограничений, связанных с ручным трудом: подверженность человеческому фактору, низкая повторяемость результатов, высокая трудоемкость и стоимость подготовки испытаний. В качестве решения предлагается системная интеграция технологий искусственного интеллекта (ИИ) в процессы НЭО. Основное внимание уделяется двум взаимодополняющим направлениям: разработке универсального конфигурируемого цифрового двойника БА КИК для автоматической генерации и верификации циклограмм испытаний на основе экспертных систем, а также созданию гибридной системы обнаружения аномалий, комбинирующей детерминированные экспертные правила и методы машинного обучения для анализа деградации характеристик и спектральных данных. Представлена поэтапная архитектура внедрения цифрового двойника, соответствующая жизненному циклу разработки аппаратуры. Заданы этапы формирования анализатора аномалий ответного сигнала. Показано, что предлагаемый подход соответствует принципам модельно-ориентированного проектирования и способствует цифровой трансформации испытательных процессов в ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая аппаратура, командно-измерительный комплекс, наземная экспериментальная отработка, искусственный интеллект, экспертные системы, цифровой двойник, циклограммы испытаний, модельно-ориентированное проектирование, телеметрический кадр.

Введение

Бортовая аппаратура командно-измерительных комплексов (БА КИК) является составной частью космического аппарата (КА). В зависимости от типа КА может входить в состав модуля служебных систем (бортовой комплекс управления (БКУ)) или же в состав КА [1].

Типовые требования к БА КИК по назначению:

- прием, демодуляцию и декодирование сигналов с наземных станций;
- расшифрование и проверку имитовставок радиокоманд и командно-программной информации, поступающих с наземных станций;
- исполнение команд, адресованных БА КИК, и отражение исполнения в телеметрической информации;
- передачу кодов данных программного управления в БКУ;
- прием от бортового комплекса управления информации для включения в телеметрический кадр;

- формирование пакета телеметрической информации БА КИК и передачу пакета телеметрической информации в составе телеметрического кадра на наземные станции;
- приём и исполнение программных кодов от БКУ;
- прием и ретрансляция на наземные станции сигналов измерения дальности;
- приём от бортового комплекса управления аппаратных сигналов для управления режимами работы БА КИК;
- формирование и выдача аппаратных сигналов на приборы бортового комплекса управления [2].

Объем и порядок наземной экспериментальной отработки (НЭО) БА КИК определяется комплексной программой экспериментальной отработки (КПЭО) [3]. Основной задачей НЭО является выполнение запланированного объема автономных и комплексных испытаний в составе испытательного стенда и космического аппарата соответственно, что позволяет подтвердить работоспособность системы, выявить отказы и неисправности, устранить их причины и подтвердить соответствие аппаратуры техническому заданию, протоколам стыковки и логике функционирования. Однако, настоящий процесс НЭО в значительной степени остается человеко-центрированным, как следствие все выполняемые процедуры неизбежно подвержены рискам человеческого фактора, снижению повторяемости результатов и увеличению затрат на подготовку испытаний, как во временном, так и денежном эквиваленте.

1. Переход к проведению НЭО с интеграцией искусственного интеллекта в процесс испытаний

В последние годы наблюдается бурное развитие технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и цифровых двойников. Их внедрение в процессы НЭО командно-измерительных комплексов открывает новые возможности, однако следует учитывать область применения данных технологий с точки зрения верификации и доверия к системе.

Экспертные системы (ЭС) являются типом искусственного интеллекта, который основан на явном представлении человеческих знаний в виде правил и фактов. ЭС являются сильным инструментом, но важно избегать субъективности и когнитивных искажений эксперта. Эксперт формирует правила на основе своего опыта, который может содержать «слепые пятна», предубеждения или упрощения. Данный недостаток решается за счет коллективного согласования правил (например, методом Дельфи), так предложенные правила и факты верифицируются посредством группового мнения специалистов.

В областях, связанных с космической техникой, недостаточно констатировать факт отклонения или получения результата – необходимо понять его причинно-следственные связи, чтобы принять дальнейшее решение по работе с системой.

Исследуя процесс НЭО командно-измерительных комплексов необходимо четко разграничить следующие аспекты:

- какие процессы или процедуры НЭО позволяют интегрировать искусственный интеллект в цикл испытаний;
- приоритет интегрируемых систем искусственного интеллекта должен отдаваться прозрачным и детерминированным экспертным системам, а методы машинного обучения должны применяться строго ограниченно, в гибридных схемах, для решения специфических задач.

2. Основная часть

2.1 Типовые задачи КПЭО БА КИК

Задачами наземных автономных испытаний БА КИК являются:

- проверка соответствия характеристик опытных образцов требованиям ТЗ;

- проверка работоспособности аппаратуры и входящих в нее составных частей (СЧ) на соответствие требованиям ТЗ;
 - выявление и устранение ненадёжных и недопустимых режимов работы ЭРИ;
 - оценка выполнения требований к надёжности аппаратуры;
 - отработка на заданные уровни механических нагрузок;
 - автономная отработка программного обеспечения;
 - проверка взаимодействия, выявление и устранение конструкторских дефектов;
 - проверка электромагнитной совместимости системы;
 - системная отработка программного обеспечения;
 - отработка конструкторской и эксплуатационной документации;
 - определение готовности к комплексным испытаниям.
- Задачами наземных комплексных испытаний БА КИК являются:
- отработка аппаратуры совместно с другими системами и приборами из состава космического аппарата;
 - проверка электромагнитной совместимости аппаратуры с другими системами и приборами, входящими в состав космического аппарата;
 - выявление и устранение конструкторских и производственных дефектов при стыковке сопрягаемых систем и приборов;
 - дальнейшая отработка конструкторской документации;
 - отработка эксплуатационной документации аппаратуры и приборов;
 - предварительная оценка соответствия основных технических характеристик аппаратуры требованиям ТЗ, в том числе оценка выполнения требований по надёжности;
 - определение готовности аппаратуры к лётным испытаниям.

2.2 Область применения искусственного интеллекта в БА КИК

Исходя из вышеописанных типовых процедур, предъявляемых в КПЭО, применение искусственного интеллекта возможно в следующих областях:

- создание цифрового двойника командно-измерительного комплекса с автоматической генерацией циклограмм испытаний, включающей проверку полноты и непротиворечивости процедур;
- система обнаружения аномалий ответного сигнала: отслеживание изменений характеристик сигнала и деградации аппаратуры.

2.3 Цифровой двойник БА КИК

Программный комплекс должен быть унифицированным как для всех теоретически возможных, так и уже разрабатываемых систем, что обеспечивается гибкостью настройки посредством конфигурации человеком-оператором в соответствии с конструкторской документацией на изделие: перечень команд, перечень телеметрических параметров, протоколы логики работы. Таким образом инженер формирует базу знаний.

Цифровой двойник БА КИК по интеграции в процессы НЭО возможно разделить на следующие этапы:

- изолированный цифровой двойник, не имеющий программного сопряжения с другими системами космического аппарата, которые также являются цифровыми двойниками своих систем. Такой цифровой двойник создается на этапе завершения выпуска конструкторской документации на БА КИК, до реализации в физическом представлении. Предназначен для имитации работы аппаратуры в соответствии с заданной конфигурацией системы – ручное управление виртуальной системой человеком-оператором;
- автоматическая генерация циклограмм испытаний для отработки на реальном изделии, как в составе испытательного стенда на технологическом комплексе, так и в составе

космического аппарата. Формирование циклограмм испытаний на основе экспертных систем с проверкой полноты и непротиворечивости процедур;

– искусственное введение неисправностей в работу цифрового двойника для помощи в составлении методик парирования аварийных ситуаций. Проводятся симуляции отказа составных частей и режимов работы БА КИК как в явном виде, так и скрытом от человека-оператора, что вносит фактор имитации работы с реальным изделием;

– программное сопряжение цифрового двойника с другими системами космического аппарата.

Приведенные этапы интеграции имеют прямую корреляцию с этапами диссертационного исследования, суть которых в формировании архитектуры каждого из приведенных модулей программного комплекса.

2.4 Система обнаружения аномалий

Кратковременная потеря телеметрии или же полный разрыв связи с космическим аппаратом при наземных является критичным случаем так как на это время теряется контроль состояния всего космического аппарата (аппаратная и программная телеметрия всех систем КА). Ввиду того, что космическая техника должна соответствовать требованиям по надежности и в целом не иметь подобных прецедентов при ее работе, то такие случаи исследуются на предмет причин возникновения: так как проблема может быть вызвана не только неисправностью БА КИК, то необходимо исключить или же подтвердить ее принадлежность к проблеме. К сопутствующим причинам возникновения обрыва связи можно отнести: наводки в системе электропитания, излучение от других приборов из состава КА, одновременная работа нескольких КА вблизи друг друга.

Для того, чтобы обеспечить БА КИК функционалом мониторинга и анализа спектральных данных определены следующие этапы исследования:

– учет программным комплексом всех существующих анализаторов спектра, способных извлекать данные, а также интеграции неизвестных ранее;

– требования к извлекаемым данным: характеристики сигнала, количество точек отсчета, мета-данные и др.;

– требования к хранению извлекаемых данных: формат данных, эффективность хранения больших объемов данных, наличие встроенного сжатия данных, иерархическая структура, кроссплатформенность, необходимость серверного оборудования;

– взаимосвязь режимов работы БА КИК с извлекаемыми данными с анализатора спектра;

– воспроизведение графиков из извлеченных данных для ручного анализа;

– требования к режимам обработки данных («разовый снимок», непрерывный анализ в течении испытаний, оценка деградации предающего устройства в длительном временном промежутке);

– подходы к обнаружению аномалий в ответном сигнале: гибридная архитектура, объединяющая экспертные системы и нейросетевую обработку.

В финальном решении детектор аномалий должен объединять непрерывный анализ спектра и сбор телеметрии в единый инструмент мониторинга. Он позволит автоматически фиксировать время и параметры любых отклонений ответного высокочастотного сигнала и ускорит диагностику причин сбоев и отказов. Предположительно детектор аномалий можно расширить прогнозной аналитикой (например, LSTM для предсказания отказов), но исходно цель – надежный алгоритм обнаружения и регистрации аномалий.

Выводы

Таким образом, исследование методов системной интеграции искусственного интеллекта в процессы наземной экспериментальной отработки бортовой аппаратуры команд-

но-измерительных комплексов является актуальным направлением, соответствующим мировым трендам цифровизации испытательных процессов, повышения автономности систем, а также переходу к модельно-ориентированному проектированию испытаний, что в конечном итоге повышает технологическую зрелость и конкурентоспособность отечественной космической техники.

Внедрение данной методологии также позволит достичь следующих результатов:

- сокращение времени и затрат на подготовку испытаний;
- повышение качества и надежности испытаний;
- создание цифровой нити, связывающей этапы конструкторской документации, виртуальной отработки, наземных испытаний и, в перспективе, анализа полетных данных.

Библиографические ссылки

1. Бровкин, А.Г. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие под редакцией А.С. Сырова / Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко и др. // МАИ-ПРИНТ. – Москва. – 2010. – С. 304. (дата обращения 08.01.2026).

2. Галантерник, Ю.М. Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами / А.В. Гориш, А.Ф. Калинин // Росавиакосмос. – Москва. – 2003. – С. 102. (дата обращения 08.01.2026).

3. ГОСТ Р 59174-2020 Ракетно-космическая техника. Система отработки технологических процессов создания изделий. Основные положения (дата обращения 08.01.2026).

© Сбитнев Д. В., Поляк М. Г., 2026

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. Ю. Журавлев, Е. В. Шестова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: schestowa.alena2015@yandex.ru

В статье рассматриваются малые космические аппараты и их применение при самых неожиданных задачах. Для обеспечения минимального возмущающего момента при работе двигателя, его вектор тяги должен проходить через центр масс космического аппарата, причем с уменьшением его размеров и массы, требование к точности соблюдения этого условия возрастает. Наличие же баков с рабочим телом и, как следствие, изменение положения центра масс малого космического аппарата с течением времени с одной стороны накладывает ограничения на компоновку аппарата, а с другой – требует наличия на борту достаточно мощной системы ориентации корпуса, способной парировать возмущающие моменты корректирующей двигательной установки. В качестве двигательных установок для малого космического аппарата могут рассматриваться корректирующая двигательная установка на основе стационарного плазменного двигателя, работающего на ксеноне, корректирующая двигательная установка на основе термokatалитического гидразинового двигателя, корректирующая двигательная установка на основе жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Перспективы использования современных двигательных установок на базе различных типов двигателей для малого космического аппарата, а также выбор и обоснование наиболее подходящего типа двигателя для данной задачи.

Ключевые слова: малый космический аппарат, система коррекции, двигательная установка, электрореактивная двигательная установка, стационарный плазменный двигатель, ионный двигатель, термokatалитический двигатель, жидкостный ракетный двигатель, пневмосистема, удельный импульс, суммарный импульс, система электропитания.

Актуальность работы в том, что Россия практически не имеет спутниковых систем на базе малых космических аппаратов (МКА), хотя они имеют ряд преимуществ и могут выполнять некоторые задачи более эффективно, чем большие космические аппараты (КА), как например дистанционное зондирование Земли. В настоящее время в России идет активная разработка множества низкоорбитальных спутниковых систем на базе МКА. Рассмотрев перспективы использования современных двигательных установок на базе различных типов двигателей (холодный газ (пневмосистема), термokatалитический двигатель, жидкостной ракетный двигатель малой тяги, электрореактивные двигатели (стационарный плазменный и ионный)), а также выбор и обоснование наиболее подходящего типа двигателя для малого космического аппарата, были поставлены цели исследования:

- обзор возможных типов двигательных установок (ДУ) для МКА и принципов работы различных двигателей;
- анализ возможности унификации ДУ на базе существующих отечественных двигателей различного типа;
- определение диапазонов суммарного импульса, в которых целесообразно использовать конкретный тип ДУ на низких орбитах;

При выполнении работы использовались математические методы определения проектных параметров малых космических аппаратов и программно-вычислительные методы для построения графиков зависимости суммарной массы корректирующей двигательной установки от требуемого суммарного импульса.

При выборе необходимого типа корректирующей двигательной установки (КДУ) для МКА в качестве критерия целесообразно использовать минимальную массу ДУ при ограничении на суммарный импульс тяги.

Масса КДУ в основном определяется величиной суммарного импульса тяги, под которым понимается произведение тяги на суммарное время работы ДУ:

$$I_{\Sigma} = P \cdot \sum t_{\text{КДУ}}, \quad (1)$$

где P – тяга двигателя, $\sum t_{\text{КДУ}}$ – суммарное время работы двигателя.

Обычно КДУ состоит из следующих основных элементов:

- рабочее тело ракетного двигателя;
- энергетическая установка;
- система преобразования и управления (СПУ) электрической мощностью;
- система хранения и подачи рабочего тела (СХП);
- ракетный двигатель (РД);
- комплекс обеспечивающих систем (КОС);
- конструкция КДУ.

Применительно к электро-ракетным ДУ уместно учитывать массу СЭП. Статистику значения масс оборудования (СХП, СПУ, КОС, конструкции и т.п.) для всех типов ДУ собрать затруднительно, поэтому расчёт массы ДУ выполнен по эмпирическим зависимостям. Массу КДУ можно выразить следующим образом:

$$M_{\text{КДУ}} = M_{\text{РТ}} + M_{\text{СПУ}} + M_{\text{СХП}} + M_{\text{ДВ}} + M_{\text{КОС}} + M_{\text{К}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{РТ}}$ – масса топлива КДУ; $M_{\text{СПУ}}$ – масса СПУ (для ЭРДУ); $M_{\text{СХП}}$ – масса СХП; $M_{\text{ДВ}}$ – масса ракетного двигателя; $M_{\text{КОС}}$ – масса КОС КДУ; $M_{\text{К}}$ – масса элементов конструкции КДУ.

Выражение для массы рабочего тела/топлива, необходимый для выработки суммарного импульса имеет вид:

$$M_{\text{РТ}} = I_{\Sigma} / I_{\text{уд}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{уд}}$ – удельный импульс КДУ.

Система хранения и подачи рабочего тела/топлива включает в себя баки для хранения рабочего тела/топлива, трубопроводы, устройства подачи рабочего тела/топлива из баков к ракетным двигателям.

Масса система хранения и подачи в общем случае определяется как:

$$M_{\text{СХП}} = k_{\text{СХП}} \cdot M_{\text{РТ}} \quad (4)$$

где $k_{\text{СХП}}$ – относительная масса системы хранения и подачи рабочего тела/топлива.

СПУ предназначена для преобразования параметров электрической энергии, вырабатываемой ЭУ. Выражение для массы СПУ имеет вид:

$$M_{\text{СПУ}} = \gamma_{\text{СПУ}} \cdot N_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{СПУ}}, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{СПУ}}$ – удельная масса СПУ ($\gamma_{\text{СПУ}} = 2 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}$ кг/Вт).

Комплекс обеспечивающих систем (КОС) содержит элементы автоматики, систему обеспечения теплового режима КДУ, систему стабилизации КА на активных участках полета. Масса комплекса обеспечивающих систем определяется массой КДУ:

$$MЭУ = kКОС \cdot МКДУ, \quad (6)$$

где $kКОС$ – относительная масса КОС КДУ.

Под конструкцией КДУ понимают элементы, объединяющие перечисленные выше агрегаты и системы в единое целое и обеспечивающие передачу тяги от ДУ к КА.

Подставив выражения (3)-(6) в выражение (2), получим расчетную формулу для массы ЭРДУ.

Формула для массы ЖРД, ТКД и пневмосистемы (ГРД) будет отличаться лишь тем, что в этих типах КДУ нет СПУ. Запишем получившееся выражение:

$$M = (\sum I_{уд} (1 + k_{СХП} + k_k + k_k \cdot k_{СХП}) + M_{дв} (1 + k_k)) / (1 - k_{КОС} - k_k \cdot k_{КОС}) \quad (7)$$

Исследование оптимальных областей применения ДУ в составе МКА показало следующие результаты:

- в диапазоне суммарных импульсов тяги от 0 до ~ 200 Н·с оптимальным является применение для ДУ на базе ГРД;
- в диапазоне суммарных импульсов тяги от ~ 200 до ~ 3500 Н·с оптимальным является применение для ДУ на базе ТКД;
- применение ДУ на базе ЖРД – не является оптимальным для применения в составе МКА;
- в диапазоне суммарных импульсов тяги от ~ 3500 до ~ 6200 Н·с оптимальным является применение для ДУ на базе ЭРД СПД-50М;
- для суммарных импульсов тяги более ~ 6200 Н·с оптимальным является применение для ДУ на базе ЭРД ИД-100.

Полученные результаты имеют ориентировочный характер, и могут уточняться при изменении состава ДУ, например, при использовании баков различной вместимости и бакового коэффициента, конструктивных элементов различного массового совершенства и т.п.

В результате проведенной работы определены перспективы развития двигательных установок на базе существующих и разрабатываемых двигателей для коррекции, ориентации и стабилизации космических аппаратов, пониженной массы. Результатом исследования является обоснование возможного применения ионного двигателя для малых космических аппаратов, в том числе и унифицированных. Определены области оптимального применения каждого типа двигателей.

Библиографические ссылки

1. Малые космические аппараты. Тенденции и перспективы развития. Обзор по материалам НТИ/Серия 2. Рынки космической деятельности. – Железногорск, 2017, АО «РЕШЕТНЁВ»
2. Двигательные установки и ракетные двигатели малой тяги на различных физических принципах для систем управления малых и сверхмалых космических аппаратов / В.В. Ражков, А.В. Сулинов // Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2018. – с. 115-128. УДК 621,453
3. Беляев, Н. М. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов / Н. М. Беляев, Н. П. Белик, Е. И. Уваров. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с., ил.
4. Егорычев В.С. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги и их характеристики: учеб.пособие / В.С. Егорычев, А.В. Сулинов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-

та, 2014. – 126 с.: ил. Каталог продукции КБхиммаш // [Электронный ресурс]: <http://kbhmisaeva.ru/main.php?id=31>

5. Агеенко Ю.И. Исследование параметров смесеобразования в жидкостных ракетных двигателях малой тяги со струйноцентробежной схемой смешения компонентов топлива на стенке камеры сгорания // Космонавтика и ракетостроение № 4 (57), Королев Мос. обл., ЦНИИМАШ, 2009. С. 170-176

6. Сравнительная оценка эффективности применения перспективных типов электрореактивных двигателей в составе малых космических аппаратов / В.М. Кульков, В.А. Обухов, Ю.Г. Егоров, А.А. Белик, А.М. Крайнов // Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2012. – с. 187-194. УДК 629.78

7. Методика обоснования параметров орбиты и характеристик двигательной установки малого космического аппарата дистанционного зондирования земли / А.А. Абдурахимов, А.В. Левандович, Д.А. Мосин и др. // Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2019. – с. 12-22. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10255

© Журавлев В. Ю., Шестова Е. В., 2026

ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ОБЪЕКТОМ НА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

А. Д. Потемкин¹, Е. А. Голубев², Д. А. Науменко², Г. Л. Редкоус², А. В. Чубарь²

¹Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»

Адрес: Россия, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, д. 19

²Сибирский федеральный университет Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп.
Свободный, 79

E-mail: evgeniy_golubev@internet.ru

Аннотация: В статье рассматривается актуальность применения современных дирижаблей в различных сферах деятельности, а также представлена математическая модель для описания движения беспилотного летательного объекта. Основное внимание уделяется составлению системы дифференциальных уравнений, учитывающих силы, действующие на дирижабль, и механизм расчёта его координат в пространстве. Модель включает в себя воздействие управляющих сил, аэродинамического сопротивления, ветра, а также использование ПИД-регуляторов для управления двигателями. Результаты моделирования иллюстрируются графиками, демонстрирующими динамику движения системы.

Ключевые слова: дирижабль, системы управления, ориентация в пространстве, моделирование.

Дирижабли, как летательные аппараты легче воздуха, переживают новый этап развития после длительного периода забвения, вызванного катастрофой «Гинденбурга» в 1937 году и стремительным прогрессом авиации. Современные технологии позволяют вернуть их в эксплуатацию, но уже на качественно новом уровне. В отличие от самолетов, дирижабли обладают рядом уникальных преимуществ, включая высокую грузоподъемность, экономичность и возможность длительного нахождения в воздухе, что делает их перспективными для ряда специализированных задач [1].

Области применения дирижаблей сегодня разнообразны. В грузоперевозках они могут доставлять оборудование в удаленные районы, такие как Арктика или джунгли, где традиционный транспорт нерентабелен. В туризме они предлагают уникальные возможности для панорамных путешествий без шума и вибраций, характерных для вертолетов. В военной сфере их используют для разведки, наблюдения и даже в качестве мобильных платформ ПВО. Кроме того, дирижабли рассматриваются как альтернатива спутникам связи, поскольку могут длительное время находиться в стратосфере, обеспечивая покрытие в отдаленных регионах [2].

Для создания математической модели движения беспилотного дирижабля нам необходимо учесть несколько факторов: поступательное движение, вращение, аэродинамическое сопротивление, силы тяжести и подъемную силу. Модель будет представлять собой систему дифференциальных уравнений, которые описывают динамику движения дирижабля.

Уравнение движения можно раскрыть при помощи второго закона Ньютона:

$$m \frac{dv(t)}{dt} = F_{\text{поступ}} + F_g + F_b + F_a + F_w, \quad (1)$$

где $F_{\text{поступ}}$ – силы, связанные с управлением (тяга двигателей, рулевые силы); F_g – сила тяжести (Н); F_b – сила, поддерживающая дирижабль в воздухе (обусловлена свойствами газа в оболочке); F_a – сила, противоположная движению (аэродинамическое сопротивление); F_w – внешнее воздействие, например, сила ветра.

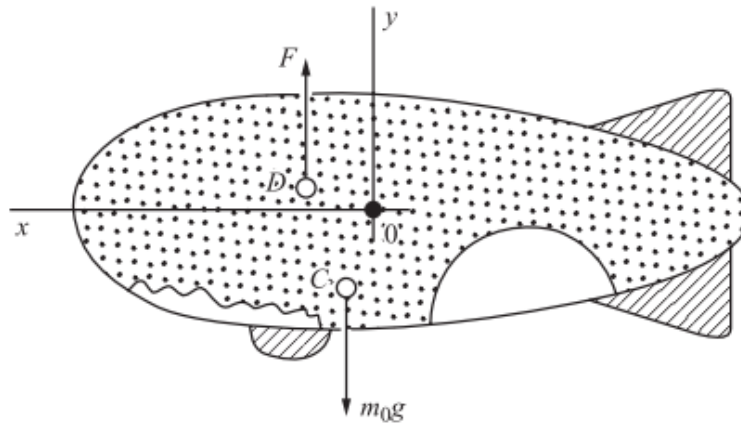


Рис. 5. Основные силы, действующие на дирижабль

Необходимо рассчитать силы действующие на дирижабль

а) Сила подъемной силы F_b .

Подъемная сила зависит от объема дирижабля и плотности окружающей среды (воздуха) и направлена вверх. Математически она выражается как:

$$F_b = \rho \cdot V \cdot g \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха (кг/м³); V – объем дирижабля (м³); g – ускорение свободного падения (м/с²).

б) Сила тяжести F_g .

$$F_g = m \cdot g \quad (3)$$

где m – масса дирижабля (кг).

в) Сила аэродинамического сопротивления F_a .

Аэродинамическое сопротивление зависит от скорости, плотности воздуха и характеристик формы дирижабля. Математически оно описывается как:

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v(t)^2 \quad (4)$$

где C_d – коэффициент сопротивления (зависит от формы и размера дирижабля); A – площадь сечения дирижабля; $v(t)$ – скорость дирижабля.

г) Сила ветра F_w .

Ветер является внешним возмущением, которое влияет на движение дирижабля. Сила ветра может быть моделирована как:

$$F_w = \rho_w \cdot A_w \cdot (v_w - v) \quad (5)$$

где ρ_w – плотность ветра; A_w – площадь поперечного сечения, подверженная воздействию ветра; v_w – скорость ветра; v – скорость дирижабля.

Расчёт координат дирижабля

В работе расчёт координат беспилотного дирижабля в пространстве реализуется на основе получаемых скоростей от двух двигателей, каждый из которых управляется через ПИД-регулятор (рисунок 2). Конечные выходы моделей двигателей (модули «Редуктор») представляют собой линейные скорости движения с каждой стороны корпуса дирижабля. Эти значения используются для определения текущего положения объекта в двухмерной плоскости [3].

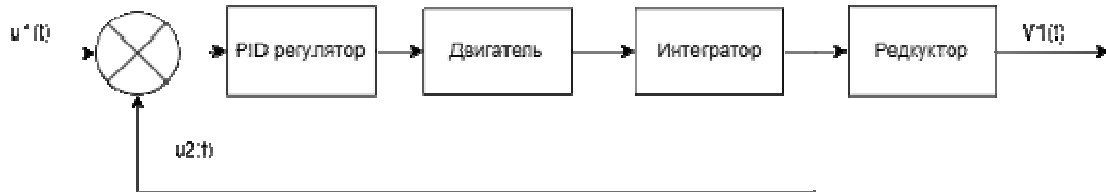


Рис. 6. – Структурная схема двигателя

Поскольку каждый двигатель может создавать различную скорость, возникает разница в тяге, которая приводит к повороту корпуса. Таким образом, для расчёта координат необходимо учитывать как суммарную поступательную скорость, так и угол курса дирижабля.

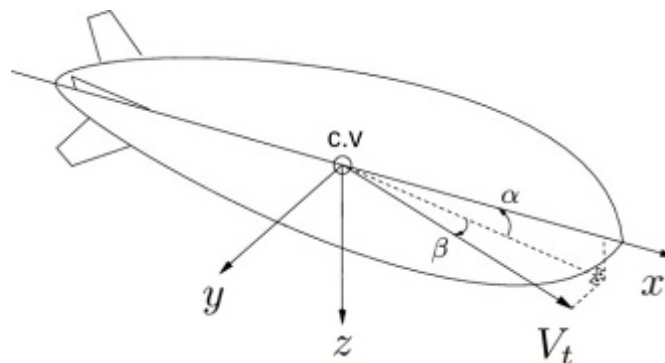


Рис. 7. Аэродинамические оси дирижабля

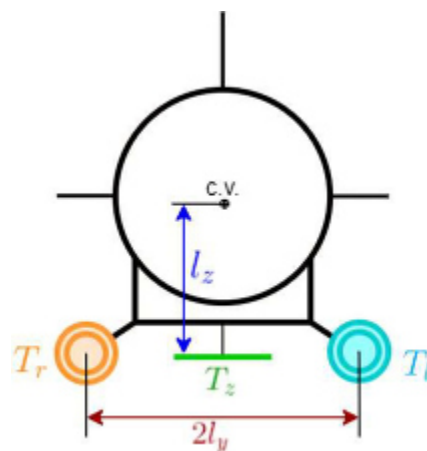


Рис. 8. Двигатель дирижабля (вид спереди)

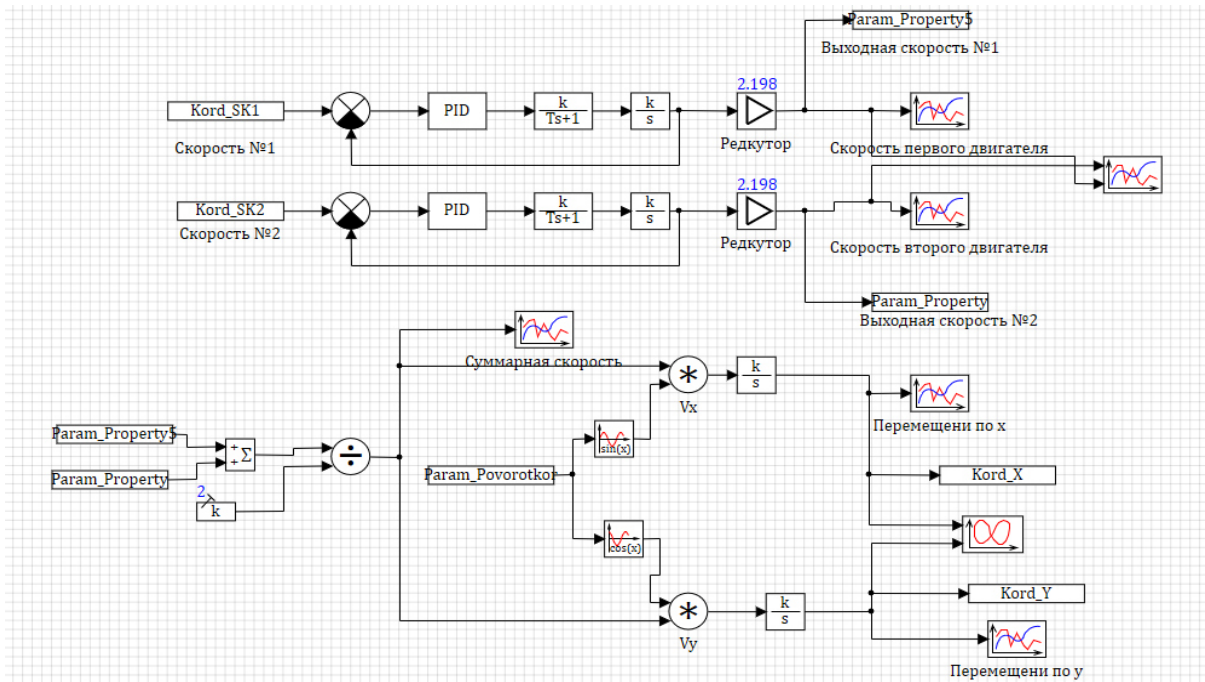


Рис. 9. Схема моделирования

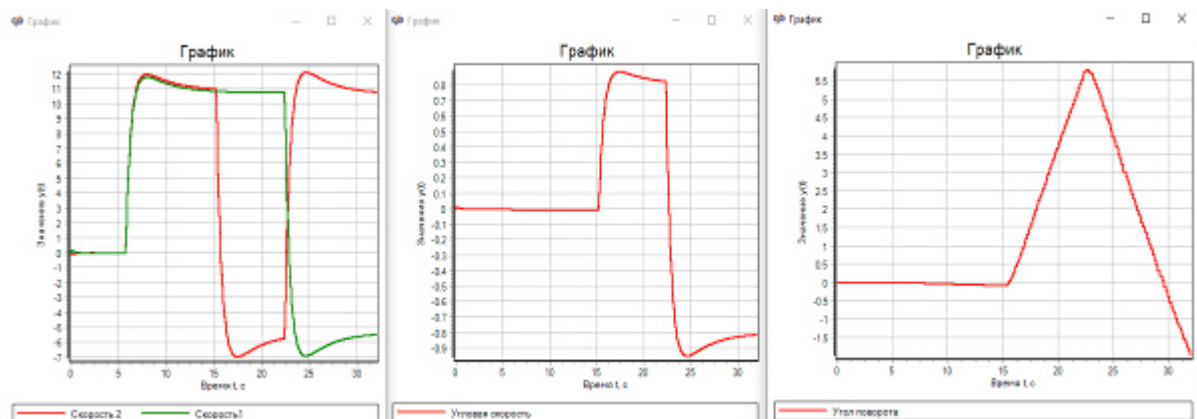


Рис. 10. Графики моделирование системы

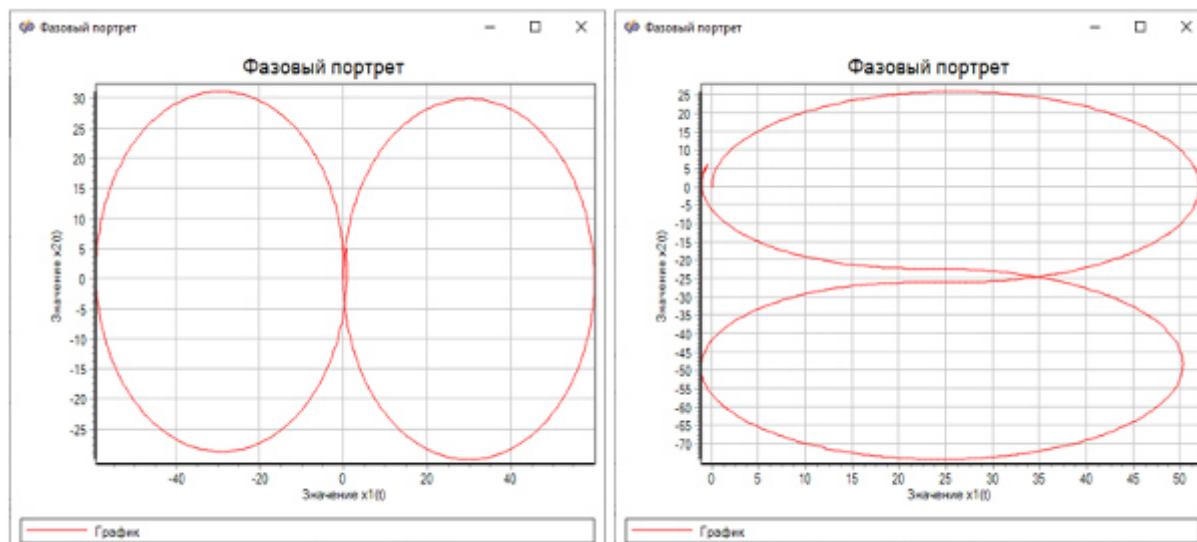


Рис. 11. Графики движения на основе разности скоростей двигателей

Разность между скоростями двигателей приводит к вращению дирижабля. Угловая скорость рассчитывается по формуле:

$$\omega(t) = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L}, \quad (6)$$

где $V_1(t), V_2(t)$ – текущие скорости от двигателя №1 и №2; L – расстояние между двигателями;

Угол поворота (курс) вычисляется как интеграл от угловой скорости:

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt, \quad (7)$$

Скорость поступательного движения (вдоль направления корпуса) определяется как среднее значение скоростей двух двигателей:

$$V_{\text{сум}} = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad (8)$$

Математическая модель движения описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} V_x(t) = V_{\text{сум}}(t) \cdot \cos \theta(t), \\ V_y(t) = V_{\text{сум}}(t) \cdot \sin \theta(t), \end{cases} \quad (9)$$

где V_x – движение по оси x ; V_y – движение по оси y ;

Координаты дирижабля во времени определяются интегрированием полученных скоростей по осям:

$$\begin{aligned} X(t) &= \int V_x(t) dt, \\ Y(t) &= \int V_y(t) dt, \end{aligned} \quad (10)$$

Получаемые на выходе модели скорости $V_1(t), V_2(t)$ формируются не напрямую, а через динамическую систему с ПИД-регулятором, инерционным звеном и учётом массы дирижабля.

Таким образом, такие факторы, как:

- изменение массы со временем;
- сила аэродинамического сопротивления;
- воздействие ветра.

На основании полученных формул расчета движения дирижабля, смоделируем его траекторию движения. Общая схема модели представлена на рисунке 5.

Библиографические ссылки

1. Воронин А.В. Теория автоматического управления. Основы построения и анализа систем автоматического регулирования: учебно-методическое пособие// Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 51 с.
2. Mohamed Atyuа Optimal tracking control for underactuated airship / Mohamed Atyuа, Gamal M. ElBayoumi & Mohamed Lotfy // Journal of Engineering and Applied Science. – 2024. – № 71. – С.24-30
3. Шевченко А.Ю. Практика моделирования в SimInTech: руководство пользователя. – Красноярск: СФУ, 2022.
4. Хиллов А.А., Воронцов А.А. Аэродинамика дирижаблей: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2019

**ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕЛЬТА-СИГМА
АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ СВЯЗАННЫХ С ИССЛЕДОВАНИЕМ ПРОТЕКАЮЩИХ
ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

А. С. Иванов

Научный руководитель – А. А. Арнгольд

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: iace9909@yandex.ru

В работе проводится сравнительный анализ архитектур аналогово – цифровых преобразователей, выделяющий ключевые преимущества, дельта – сигма преобразователей для задач испытаний, диагностики и проведения экспериментов связанных с изучением внутренних процессов ЖРД.

Ключевые слова: дельта-сигма, АЦП, внутренние процессы, жидкостный ракетный двигатель, измерения, неустойчивость горения.

Изучение высокочастотных и низкоамплитудных внутренних процессов (пульсаций давления, акустических колебаний, признаков неустойчивости горения) является критически важным для повышения надёжности и эффективности ЖРД. Традиционные средства измерений зачастую не обеспечивают необходимого сочетания высокой динамической точности и широкой полосы пропускания для детектирования этих явлений.

Исследование внутренних процессов, проходящих в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), дает возможность к пониманию неустойчивости горения, акустических колебаний, пульсаций давления, тепловых потоков и гидравлических сопротивлений на разных участках тракта охлаждения. Данные процессы:

- 1) Высокочастотные: от сотен Гц до нескольких или десятков кГц (высокочастотная неустойчивость).
- 2) Низкоамплитудные: колебания давления на фоне стационарного в сотни атмосфер могут составлять доли процента, но быть критичными.
- 3) Требующие высокой динамической точности: различие мельчайших измерений сигнала на фоне шумов.
- 4) Требующие максимальной автоматизации (кратковременность испытаний двигателя практически исключает возможность проведения оператором какого-либо анализа показателей). [1]

Главной мыслью в данной работе является проверка возможности замены традиционных средств измерений, таких как: частотные, резонансные, аналогово цифровые преобразователи (АЦП) последовательного приближения, на высокоточные дельта – сигма ($\Delta\Sigma$) АЦП в системах диагностики испытаниях и экспериментов ЖРД, с целью получения высокоточных данных о быстропротекающих и низкоамплитудных процессах в камере двигателя и также снижению стоимости при проектировании и изготовлении стендов для проведения данных мероприятий.

Традиционные АЦП (рис 1) имеют разрядность 12-16 бит, с частотой дискретизации 100 – 500 кГц часто не обеспечивают необходимого соотношения предъявленных для проведения исследований процессов в ЖРД, а именно точности показаний которой соответствует разрядность АЦП и скорости измерения показания. [2]

$\Delta\Sigma$ архитектура принципиально отличается (рис 2). Она оцифровывает сигнал с очень высокой разрядностью от 16 до 32 бит достигается это за счет переноса шума квантования в высокочастотную область с последующей цифровой фильтрацией.

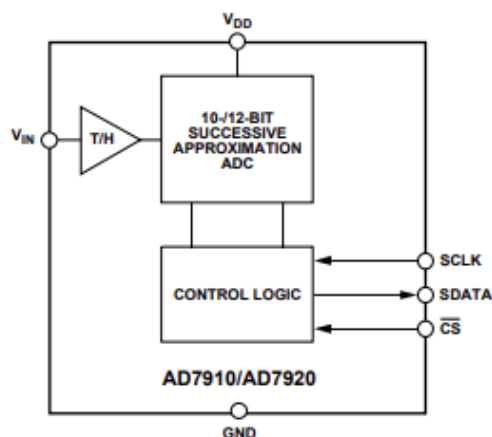


Рис 1. Архитектура АЦП последовательного приближения AD 7910

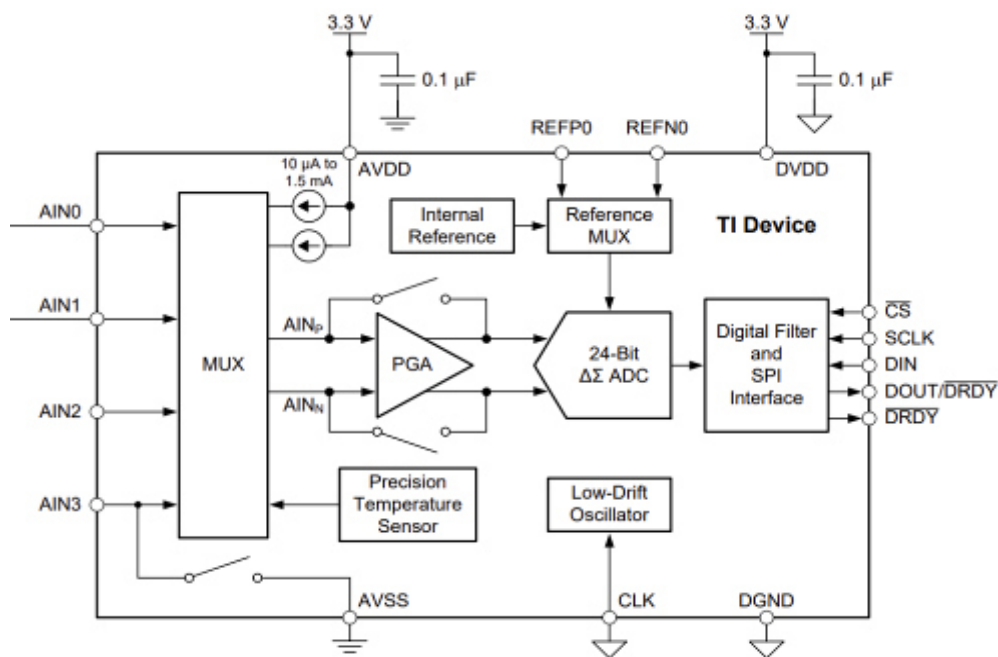


Рис 2. Архитектура $\Delta\Sigma$ АЦП ADS 1220

Рассмотрим технические и экономические преимущества $\Delta\Sigma$ АЦП, перед обычными АЦП.

1) Соотношения сигнал/шум и эффективное число разрядов 24 – 32 битные $\Delta\Sigma$ АЦП обеспечивают возможность детектировать сверхмалые колебания давления (например, от возникающей неустойчивости горения), которые обычные АЦП не могут обнаружить.

2) Встроенная цифровая фильтрация: подавляет сетевую помеху (50 Гц) и ее гармоники, что особенно важно для научных и промышленных стендов так-как исчезает потребность в дополнительных устройствах фильтрации сетевых помех, соответственно уменьшая конечную стоимость стенда.

3) Высокая линейность и отсутствие дифференциальной нелинейности. Данная особенность является особой важной для точного спектрального анализа, так как искажения АЦП могут создавать ложные гармоники в спектре колебаний.

4) Устойчивость к синфазным помехам: является преимуществом если в стенде имеются электромагнитные наводки.

5) Компенсация температурной инертности, благодаря встроенному температурному датчику.

6) Возможность прямого подключения датчиков: например, мостовых тензодатчиков существует $\Delta\Sigma$ АЦП со встроенными источниками возбуждения и усилителями что позволяет, снимать показания без использование дополнительных средств преобразования [3].

Рассмотрим на примере преимущества $\Delta\Sigma$ АЦП на конкретном примере.

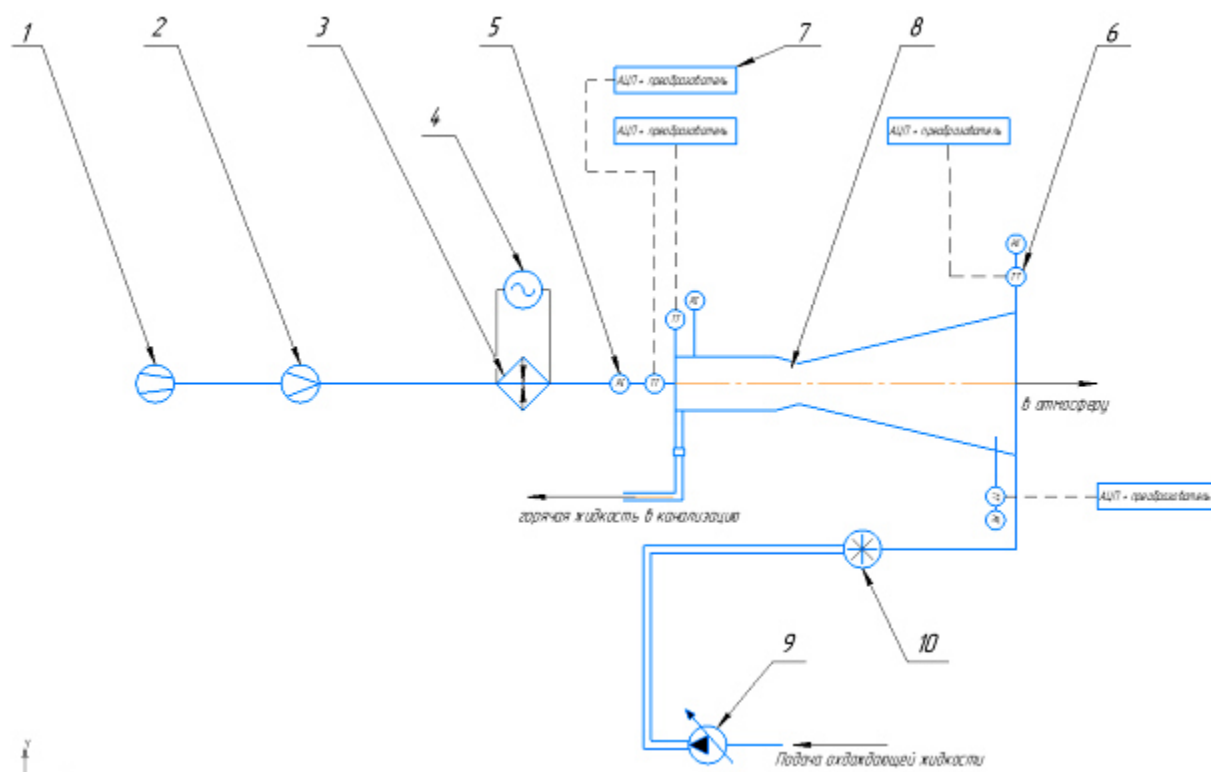


Рис 3. Принципиальная пневмогидравлическая схема стенда испытаний ракетного двигателя
 1 – установка сжатого воздуха высокого давления, 2 – вихревой расходомер, 3 – нагреватель,
 4 – источник питания, 5 – манометр (4 шт.), 6 – термосопротивления РТ100 класса А (4 шт.),
 7 – АЦП последовательного приближения с преобразователем типа (Rex C-100),
 8 – исследуемая установка, 9 – водяной насос, 10 – жидкостный расходомер.

Без включения установки произведем измерения показания на первом термосопротивлении сначала на АЦП последовательного приближения с преобразователем, после заменим АЦП последовательного приближения на $\Delta\Sigma$ АЦП типа MAX31865 [4] с преобразователем результат сведем в таблицу 1

Таблица 1

Показания датчиков

АЦП последовательного приближения	22,3 С°
$\Delta\Sigma$ АЦП	23,74 С°

Рассчитаем погрешность всей измерительной системы и сведём в таблицу 2

Результаты расчета абсолютной погрешности

АЦП последовательного приближения			
погрешность АЦП	погрешность разбаланса проводов 1м (0,01) Ом	погрешность РТ100 (Кл А)	Абсолютная погрешность
2 С°	0,026 С°	0,194 С°	2,009 С°
ΔΣ АЦП			
погрешность АЦП	погрешность разбаланса проводов 1м (0,01) Ом	погрешность РТ100 (Кл А)	Абсолютная погрешность
0,8 С°	0,026 С°	0,197	0,82 С°

Таким образом переход на дельта-сигма АЦП в измерительных комплексах для испытаний ЖРД представляет собой качественный скачок в метрологическом обеспечении исследований. Он открывает возможность регистрации ранее недоступных для анализа слабых и быстропротекающих процессов, таких как высокоточный спектральный анализ низкоуровневых акустических колебаний и пульсаций давления, выявление высокочастотной неустойчивости на ранних стадиях, изучение режимов с частичной неустойчивостью также ΔΣ АЦП позволяет отслеживать изменение чувствительности и смещение нуля датчиков давления и вибрации в реальном времени в ходе длительных огневых испытаний. Многоскоростные ΔΣ АЦП (с перестраиваемой частотой среза фильтра) могут обеспечить высокое разрешение на установившемся режиме и широкую полосу пропускания при исследовании переходных процессов (запуск, выключение, сброс режима).

Что непосредственно способствует углублению понимания физики работы двигателя и созданию более совершенных конструкций.

Библиографические ссылки

1. Жуковский, А. Е. Испытания жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов авиационных специальностей вузов / А. Е. Жуковский, В. С. Кондрусев, В. В. Окорочков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1992. – 352 с.: ил.
2. Analog Devices. AD7910 12-Bit, 1 MSPS ADC with On-Chip Temperature Sensor and Reference: Data Sheet / Analog Devices, Inc. – Rev. E. – 2023. – 32 p. – URL: <https://www.analog.com/AD7910> (дата обращения: 13.02.2026).
3. Texas Instruments. ADS1220 24-Bit, 2-kSPS, 4-Channel Delta-Sigma ADC with PGA, Voltage Reference, and Sensor Excitation: Data Sheet / Texas Instruments Incorporated. – Revision F. – 2023. – 76 p. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1220.pdf> (дата обращения: 13.02.2026).
4. Maxim Integrated. MAX31865 Cold Junction Compensated RTD to Digital Converter: Data Sheet / Maxim Integrated Products, Inc. – Rev. 3. – 2022. – 28 p. – URL: <https://www.analog.com/MAX31865> (дата обращения: 13.02.2026).

© Иванов А. С., 2026

СОЗДАНИЕ УЧЕБНОЙ МОДЕЛИ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА МЕТОДОМ FDM ПЕЧАТИ

П. В. Сёмин, Д. А. Борисов
Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: petr1semin@yandex.ru

Современное образование в области ракетного двигателестроения сталкивается с противоречием между сложностью объекта изучения и ограниченностью учебного времени для освоения всех видов последующей профессиональной деятельности. Наряду с усвоением всех физических принципов реализуемых в жидкостных ракетных двигателях, методов проектирования, расчетных методик, технологических процессов при производстве и испытаниях узлов и агрегатов, ряд вопросов остается вне учебной программы. Два таких вопроса рассмотрены в данной работе. Первый касается бурно развивающейся технологии 3D-печати, её особенностей и ограничений. Второй вопрос связан с формированием у студентов практических навыков выполнения сборочных операций при производстве сложных изделий.

Ключевые слова: турбонасосный агрегат, 3D-модель, FDM-печать, параметры печати, постобработка, сборка.

Турбонасосный агрегат (ТНА) как высокоскоростная прецизионная машина характеризуется сложной геометрией проточных частей и многообразием внутренних каналов, что делает его трудным для восприятия. Традиционные методы обучения, опирающиеся на двухмерные чертежи и схемы, не позволяют в полной мере сформировать у обучающихся корректную модель пространственной компоновки деталей узлов. Отсутствие «материальности» объекта приводит к тому, что обоснованность сложных форм: корпуса, лопаток насосов, особенности уплотнений остаются за пределами внимания студента. Ситуация усугубляется недоступностью натуральных образцов, что исключает возможность их демонтажа и изучения в аудиторных условиях. Как следствие, возникает разрыв между теоретическим курсом и практическим пониманием устройства жидкостного ракетного двигателя (ЖРД).

В качестве оптимального решения данной проблемы предлагается использование технологии FDM-печати. Данный метод обладает рядом преимуществ:

- Экономическая эффективность: аддитивное производство пластиковых моделей значительно снижает затраты по сравнению с литьем металла или изготовлением промышленных макетов, делая наглядные пособия доступными для кафедр и учебных заведений.

- Дидактическая гибкость: технология позволяет создавать модели в разрезе, демонстрируя внутренние полости (улитки насосов, лопатки турбины) без разрушения агрегата. Также возможна цветовая маркировка узлов (например, насос окислителя и горючего) для улучшения визуального восприятия.

- Адаптивность: САД-модель легко модифицируется под конкретные задачи учебной программы, что обеспечивает высокую гибкость при разработке и создании пособий.

В системе ЖРД турбонасосный агрегат выполняет функцию подачи компонентов топлива в камеру сгорания и газогенераторы. Обеспечивая давление в сотни атмосфер,

ТНА обеспечивает высокое давление в камере сгорания, что определяет его роль как критически важного элемента энергетической установки. Для учебной модели данная функция диктует необходимость визуализации трактов подачи окислителя и горючего, а также демонстрации их надежной взаимной изоляции.

Архитектура и модульное строение ТНА

Конструкция классического ТНА базируется на трех основных модулях, смонтированных на общем валу, что формирует его «триадную» структуру:

Насос окислителя: функционирует в условиях воздействия агрессивных сред (жидкий кислород, азотная кислота) при криогенных или пониженных температурах, что обуславливает высокие требования к герметизации. Ключевыми элементами, подлежащими визуализации в модели, являются входной патрубков, рабочее колесо со сложнопрофильными лопатками и выходной диффузор («улитка»), обеспечивающий преобразование скоростного напора в давление.

Насос горючего: предназначен для работы с углеводородами (керосин, метан, водород) и может быть выполнен в одно- или многоступенчатом исполнении. Конструктивно аналогичен насосу окислителя и располагается на том же валу с противоположной стороны турбины, что подчеркивает принцип соосности.

Турбина: служит приводом для вала, используя энергию горячего генераторного газа. Модель должна отображать сопловой аппарат (статор), направляющий газ на лопатки рабочего колеса (ротора), жестко закрепленного на валу.

Интеграция узлов и критические элементы конструкции

Связующим звеном всех модулей выступает вал, обеспечивающий их синхронное вращение как единого целого. Критическое значение для безопасности и работоспособности ТНА имеют уплотнения, предотвращающие недопустимое смешивание жидких компонентов и горячего газа. В учебной модели зоны установки лабиринтных или торцевых уплотнений должны быть выделены конструктивно (проточками на валу или утолщениями корпуса) для акцентирования их функциональной значимости. Завершающим элементом является корпус, объединяющий все узлы в моноблок и имеющий сложную литую форму, разъемы и фланцы.

Кинематика функционирования и адаптация модели ТНА для учебных целей

Принцип действия ТНА заключается в передаче крутящего момента от турбины через вал к насосам: газ, воздействуя на рабочее колесо турбины, инициирует вращение, которое передается насосам, обеспечивающим подачу компонентов под давлением.

При создании учебной модели методом FDM-печати допустима разумная степень упрощения: соответствие номенклатуры деталей в сборке реальной конструкции ТНА; воспроизведение узнаваемой геометрии крыльчаток с сохранением характерных черт; обеспечение свободного вращения ротора для демонстрации соосности, без необходимости имитации высоких оборотов (до 100 000 об/мин), характерных для реального агрегата; возможность многократного выполнения сборки и разборки модели.

Проектирование 3D-модели для FDM-печати.

В качестве прототипа для моделирования был выбран классический одновальный турбонасосный агрегат с насосами центробежного типа и осевой турбиной. Исходными материалами служили учебные чертежи общего вида и схемы (рис. 1).

Первичный анализ показал, что прямое копирование геометрии с чертежей невозможно по следующим причинам:

- наличие внутренних полостей сложной формы («улитки» насосов, сопловые аппараты), которые в исходном виде требуют обилия поддерживающих структур;
- чрезмерная тонкостенность реальных элементов (разделительные стенки), несовместимая с прочностными характеристиками пластика и разрешением FDM-печати;

Такое разделение позволило, во-первых, печатать каждую деталь в оптимальной ориентации положения (минимизируя количество поддержек), а во-вторых, использовать разные цвета пластика для разных функциональных зон (окислителя и горючего) и деталей. Корпус модели также подвергся изменениям (рис. 3).

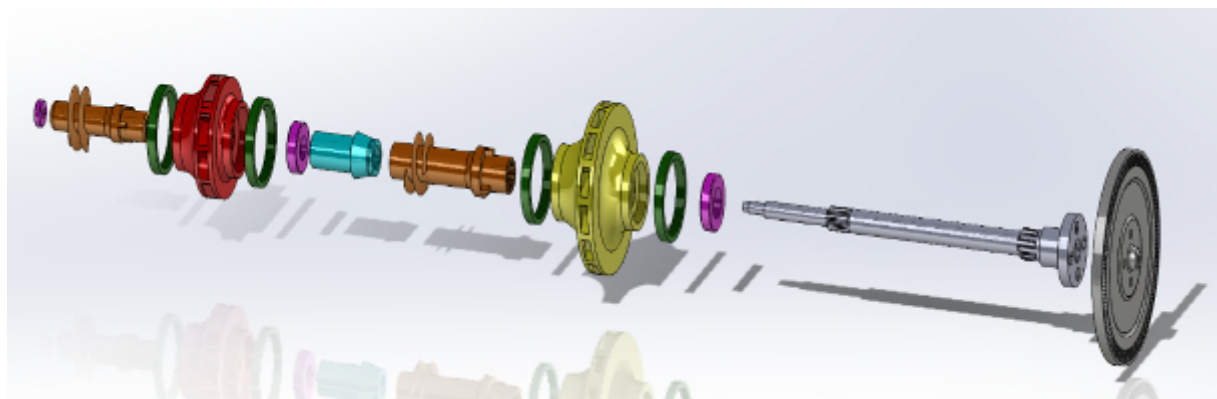


Рис. 2. Взрыв-схема учебной модели ротора ТНА.

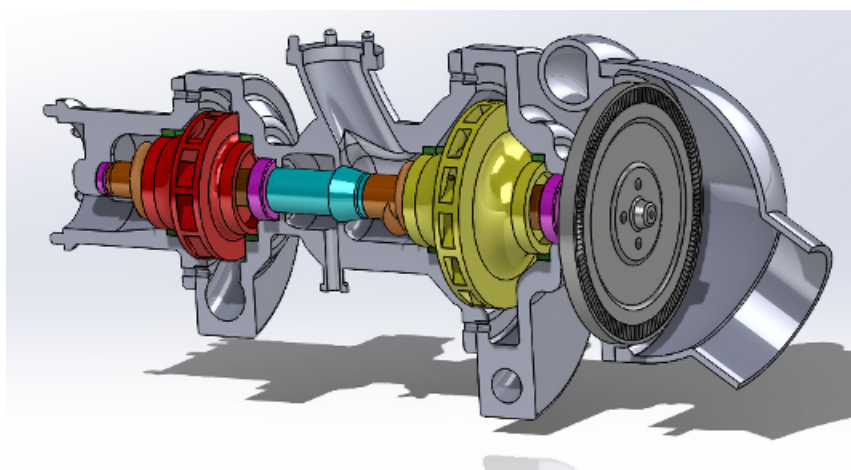


Рис. 3. Модель ТНА в сборе

Для возможности печати и сборки корпус ТНА был разбит на четыре части: первая – фланец подвода окислителя, вторая (самая сложная) рабочая полость насоса окислителя, дренажное отверстие и фланец подвода горючего, третья часть представляет собой часть от насоса горючего и часть от соплового аппарата турбины, и четвертая часть представляет собой газоотвод из рабочего колеса турбины.

Обеспечение подвижности ротора

Поскольку модель планировалась как действующая (с возможностью вращения вала от руки), особое внимание было уделено проектированию роторной группы.

Радиальный зазор между рабочими колесами и корпусами был последовательно увеличен с реальных 0,1–0,2 мм до 1,5 мм в модели. Как показано на рисунке 3, это гарантирует отсутствие заклинивания при неидеальной геометрии печати или несносности при сборке.

Результаты проектирования

Итогом работы стала полностью подготовленная к печати 3D-модель турбонасосного агрегата (рис. 3). Модель включает 17 деталей, объединенных в сборочную единицу. Ключевые характеристики модели:

- Сохранена архитектура (два насоса + турбина);
- Обеспечена визуализация внутренних полостей за счет разъемных корпусов и деталей;
- Реализована подвижность ротора;
- Геометрия всех элементов адаптирована для надежной FDM-печати без поддержек или с легкоудаляемыми поддержками.

Микротема 4: Выбор материалов и настройка параметров печати.

Постановка задачи выбора материалов

Учебная модель ТНА представляет собой сборку, состоящую из функционально разнородных деталей, что обуславливает дифференцированный подход к выбору материала для их изготовления. В рамках исследования было выделено три основные группы деталей, для каждой из которых сформулированы ключевые критерии выбора материала:

- Корпусные детали (корпуса насосов, турбины, фланцы, крышки): Основные требования – сохранение геометрической стабильности (минимизация коробления), технологичность постобработки (шлифование, грунтование, окрашивание), низкая усадка и доступность материала.
- Роторная группа (вал, рабочие колеса насосов и турбины): Приоритетные требования – высокая жесткость (для вала), износостойкость, ударная вязкость (особенно для лопаток насосов, подверженных риску повреждения на этапе сборки), а также прецизионность геометрии для обеспечения свободного вращения элементов.
- Декоративные и мелкие элементы (имитация трубопроводов, крепеж, уплотнения): Ключевые требования – высокая детализация и способность к воспроизведению тонкостенных элементов.

Сравнительный анализ доступных филаментов и выбор базового материала

Для тестирования были отобраны три наиболее распространенных типа полимерных материалов, доступных в лаборатории: PLA, PETG и ABS. Их сравнительные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики тестируемых материалов

Характеристика	PLA	PETG	ABS
Температура сопла	200–215°C	230–250°C	240–260°C
Температура стола	40–60°C	70–80°C	90–110°C
Усадка / Коробление	Низкая	Средняя	Высокая
Прочность	Хрупкий (низкое удлинение при разрыве)	Эластичный, ударопрочный	Ударопрочный
Химическая стойкость	Низкая	Средняя	Высокая
Сложность печати	Низкая	Средняя	Высокая
Детализация	Отличная	Хорошая	Хорошая

Как следует из полученных данных, PLA продемонстрировал наилучшее сочетание технологичности, детализации и стабильности геометрии. Отсутствие склонности к короблению позволило изготавливать крупногабаритные корпусные детали без использования закрытой камеры и специализированных адгезивов. Низкая температура переработки также снизила энергопотребление и риск термодформаций. Основным ограничением PLA является его относительная хрупкость, что вызывает опасения за целостность тонкостенных элементов, подверженных ударным нагрузкам.

PETG, напротив, проявил более высокие показатели ударной вязкости и эластичности, однако его использование потребовало более тщательной калибровки параметров печати и сопровождалось повышенной склонностью к образованию нитей. Материал ABS был исключен из дальнейшего рассмотрения ввиду высоких требований к условиям печати (необходимость использования закрытой камеры для предотвращения коробления).

На основании результатов тестирования была принята следующая стратегия: PLA используется в качестве базового материала для большинства деталей, включая все корпусные элементы, вал и рабочее колесо турбины. PETG применяется только для изготовления рабочих колес насосов, как наиболее нагруженных и уязвимых элементов роторной группы, требующих повышенной ударопрочности.

Сравнительный анализ типов поддерживающих структур: сетчатые и древовидные

В процессе изготовления сложнопрофильных деталей ТНА – в особенности рабочих колес насосов и турбины, а также внутренних полостей корпусов – возникла необходимость в выборе оптимального типа поддерживающих структур. Современные слайсеры предлагают два основных подхода: классические сетчатые поддержки и алгоритмические древовидные (органические) поддержки. В рамках работы было проведено сравнительное тестирование обоих типов на деталях из PLA и PETG.

Сетчатые поддержки

Первые тестовые образцы рабочих колес изготавливались с использованием стандартных сетчатых поддержек. Данный тип представляет собой регулярную решетку, заполняющую объем под нависающими элементами.

Преимущества сетчатых поддержек: предсказуемость и стабильность, формируют плотное основание, надежно удерживающее массивные нависающие элементы и эффективность при работе с крупными плоскими нависаниями.

Недостатки, выявленные при печати ТНА:

Сложность удаления: при печати рабочих колес насосов сетчатые поддержки проникали в межлопаточные каналы и образовывали прочное соединение с деталью по большой площади (рис. 5). Наиболее остро данная проблема проявлялась для PETG, характеризующегося повышенной адгезией к подержкам. Процесс удаления поддержек занимал до 30 минут на одно колесо и часто приводил к повреждению (обламыванию) кромок лопаток.

Дефекты поверхности: после отделения сетчатых поддержек на контактных поверхностях оставалась характерная шероховатая текстура, требующая длительного шлифования. Для внутренних полостей корпусов механическая обработка такого рода была практически нереализуема.



Рис. 5. Рабочее колесо насоса после удаления сетчатых поддержек: видны следы на лопатках и сколы на кромках

Древовидные поддержки (Оптимизация решения)

На втором этапе тестирования были применены древовидные поддержки (рис. 6). Данный алгоритм генерирует структуру, напоминающую ветви дерева: они контактируют с деталью только в точках, необходимых для удержания нависающих элементов, тогда как основная масса поддержки вынесена в сторону от поверхности модели.

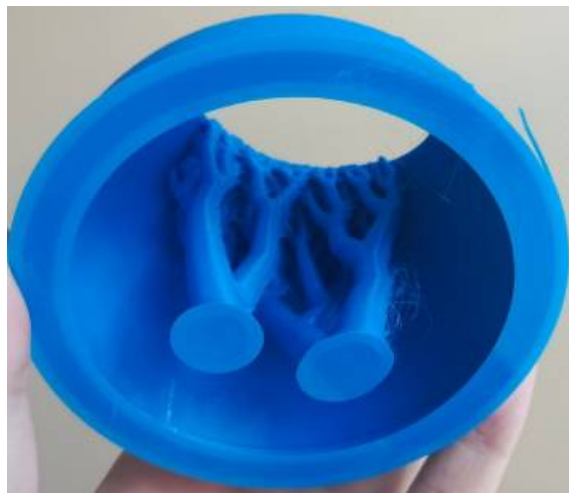


Рис. 6. Древовидные поддержки.

Преимущества древовидных поддержек:

Минимальная площадь контакта: элементы поддержки касаются детали точечно, что критически важно для сохранения сложной геометрии лопаток. Для рабочих колес турбины и насосов это означало, что поддержки контактировали только с нижними кромками лопаток, не заполняя межлопаточное пространство.

Легкость удаления: древовидные поддержки отделяются простым механическим воздействием, зачастую без применения инструментов. Для PETG данный фактор стал определяющим – поддержки разрушаются в заданных местах, не повреждая поверхность детали.

Качество поверхности: поверхности, контактировавшие с древовидными поддержками, характеризуются значительно более высоким качеством. В большинстве зон контакта остаются лишь микроскопические следы, которые легко устраняются финишной шлифовкой или не требуют обработки вовсе при расположении в скрытых полостях.

Недостатки и ограничения требуют более высокой вычислительной мощности при слайсинге и обладают недостаточной стабильностью при поддержке протяженных горизонтальных плоскостей.

Точность печати

Перед изготовлением компонентов турбонасосного агрегата была проведена комплексная калибровка оборудования и параметров слайсера. На первом этапе, с использованием температурных башен и тестовых образцов, определены оптимальные технологические параметры для каждого типа полимерного филамента. Для PLA (корпуса, вал, турбина) установлена температура сопла 205°C с принудительным обдувом; для PETG (рабочие колеса насосов) – 235°C с минимальным охлаждением. Калибровка параметров ретракции позволила практически полностью устранить образование нитей на лопатках рабочих колес.

Особое внимание уделено выбору высоты слоя с учетом ее кратности критическим размерам деталей. Для корпусных элементов использована высота слоя 0,4 мм, обеспечивающая приемлемую скорость построения при сохранении точности размеров. Для

рабочих колес, обладающих тонкими лопатками, применена высота слоя 0,3–0,4 мм, кратная высоте профиля лопаток, что позволило исключить ошибки позиционирования по оси Z.

Формирование деталей осуществлялось на стеклянной платформе с использованием адгезионного состава для обеспечения надежного сцепления первого слоя с поверхностью стола.

Постобработка и сборка

По завершении печати все компоненты проходят обязательный этап механической доводки, который условно можно разделить на две основные операции.

Первая операция – удаление поддерживающих структур. С деталей удаляются все технологические элементы, обеспечивавшие печать нависающих участков: сетчатые поддержки из внутренних полостей корпусов и древовидные структуры с лопаток рабочих колес. Работа выполняется вручную с использованием слесарного инструмента (плоскогубцы, скальпели, надфили). Цель – полное удаление поддержек без повреждения геометрии детали.

Вторая, наиболее критичная операция – подготовка посадочных поверхностей. Шлифовке подлежат следующие элементы: поверхность вала (обеспечение свободного хода), внутренние полости корпусов в зоне вращения рабочих колес для предотвращения задеваний, а также стыковочные фланцы корпусов (герметичность соединения половинок).

Только после выполнения этих операций детали считаются готовыми к занятию своих рабочих позиций в общей сборке турбонасосного агрегата. Пропуск или некачественное выполнение любого из этапов приводит к невозможности корректной сборки или нарушениям в работе подвижных элементов.

Библиографические ссылки

1. Воронцов Д.А., Криворотько П.В., Гладкова Н.Д. и др. Компрессионная оптическая когерентная эластография для оценки статуса лимфатических узлов при ранних стадиях рака молочной железы // Вопросы онкологии. – 2023. – №5. – С. 885–896.
2. Гришанов В.Н., Ойнонен А.А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – №1. – С. 24–28.
3. Арташов А. Д. Пособие по конструированию изделий, изготавливаемых по технологии FDM : учеб. пособие / А. Д. Арташов, А. Д. Талыгин. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 121 с.
4. Малахо А. П. FDM-печать изделий машиностроения из суперконструкционных полимерных материалов: учеб. Пособие / А. П.Малахо , В. Г. Миронов – Тула: ТулГУ, 2024. – 88 с.
5. Шкуро, А.Е. Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 101 с.
6. Комаров В. 3D-печать. Моделирование методом наплавления (FDM) Методич. Пособие – Санкт Петербург, 2019. 89 с.
7. Хрусталева, Н. В. Особенности 3D-печати и фотограмметрии : учеб. пособие / Н. В. Хрусталева ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – 200 с.

© Борисов Д. А., Сёмин П. В., 2025

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ С ЦЕЛЬЮ АДАПТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ К НАЗЕМНЫМ УСЛОВИЯМ

Д. П. Рейфшнейдер^{*}, Н. А. Кудрявцев, Б. А. Раменский
Научный руководитель – В. П. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
^{*}E-mail: buzalingo@yandex.ru

В работе представлены результаты оптимизации камеры ракетного двигателя малой тяги при испытаниях в наземных условиях. Численное моделирование позволило подобрать степень расширения сопла, исключаящую отрыв потока. Предложена монолитная конструкция, пригодная для изготовления методом SLM-печати.

Ключевые слова: РДМТ, камера сгорания, сопло, степень расширения, газодинамика, отрыв потока, численное моделирование, аддитивные технологии, SLM.

В процессе реализации комплексного проекта, направленного на создание и отработку демонстратора ракетного двигателя малой тяги (РДМТ), функционирующего на экологически безопасных компонентах топлива, были проведены стендовые огневые испытания опытного образца. Данные испытания преследовали цель проверки работоспособности конструкции, изготовленной методом аддитивной технологии, а также верификации заложенных проектных параметров. В качестве топливной пары использовались газообразные кислород и метан.

Анализ результатов эксперимента показал, что двигатель функционировал в режиме перерасширения рабочего тела. Данный режим характеризуется тем, что статическое давление газового потока на срезе сопла (P_a) оказывается значительно ниже давления окружающей среды (P_n), в которой происходит истечение (в данном случае – атмосферное давление). Поскольку проектирование двигателя выполнялось из расчета работы в условиях вакуума ($P_a = 0,00085$ МПа при $P_n = 0,0005$ МПа), значительное превышение наружного давления над расчетным привело к работе камеры РДМТ в режиме перерасширения. Наружное атмосферное давление, будучи более высоким, начинает «сдавливаться» поток, что приводит к формированию системы скачков уплотнения внутри сверхзвуковой части сопла. Как следствие, происходит отрыв потока продуктов сгорания от стенок соплового насадка. Данное явление отчетливо фиксировалось визуально: наличие характерного «бочкообразного» свечения и нестабильность факела. Отрыв потока приводит к тому, что значительная часть сверхзвукового сопла работает в нерасчетном, дозвуковом режиме с интенсивным вихреобразованием, что влечет за собой потери полного давления и, как следствие, недовыработку запланированной тяги и снижение удельного импульса.

С целью устранения отрыва потока и адаптации испытуемого образца к условиям стенда, было принято решение об оптимизации геометрии соплового насадка. Основной задачей оптимизации являлось предотвращение отрыва потока путем уменьшения степени расширения сопла, которая определяется соотношением площади среза сопла к площади критического сечения ($F = F_a/F_{кр}$).

Для выбора рациональной геометрии был применен метод численного моделирования газодинамических процессов в пакете программного обеспечения SolidWorks Flow

Simulation. В качестве исходной точки для верификации расчетной модели был взят уже испытанный образец камеры со степенью расширения сопла $F = 80$. Проведенный вычислительный эксперимент для исходной модели продемонстрировал хорошую сходимость с данными, полученными эмпирическим путем. На полученной картине течения (рисунок 1) отчетливо видна зона отрыва потока от стенки сопла в его расширяющейся части, а также образование обратных токов и вихревых структур, полностью идентичных наблюдаемым при натурных испытаниях. Это совпадение позволило сделать вывод о построенной математической модели и корректности выбранных граничных условий, что, в свою очередь, дало основание использовать данную методику для дальнейшего виртуального исследования оптимизированных вариантов конструкции [1].

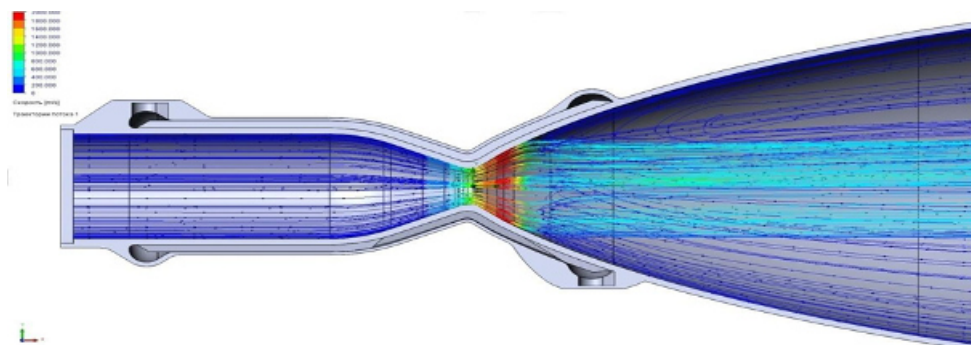


Рис. 1. Траектории продуктов сгорания камеры со степенью расширения сопла $F = 80$

В рамках параметрического исследования были разработаны и подвергнуты численному анализу три альтернативные модели камеры сгорания, отличающиеся уменьшенной степенью расширения сопла: $F = 25$, $F = 10$ и $F = 5$. Для каждого из этих вариантов в среде SolidWorks Flow Simulation были проведены расчеты рабочего процесса при тех же граничных условиях (давление в камере сгорания, температура, состав продуктов сгорания), что и в натурном эксперименте, но с измененной геометрией соплового насадка. Основное внимание уделялось анализу структуры потока и наличию/отсутствию зон отрыва.

Анализ течения в сопле со степенью расширения $F = 25$ (рисунок 2) показал, что интенсивность отрыва потока заметно снизилась по сравнению с исходным вариантом $F=80$, но зона отрывного течения все еще присутствует, особенно в периферийных областях выходного сечения. Это говорит о том, что данная степень расширения является недостаточно эффективной для полного устранения проблемы при данном уровне противодавления.

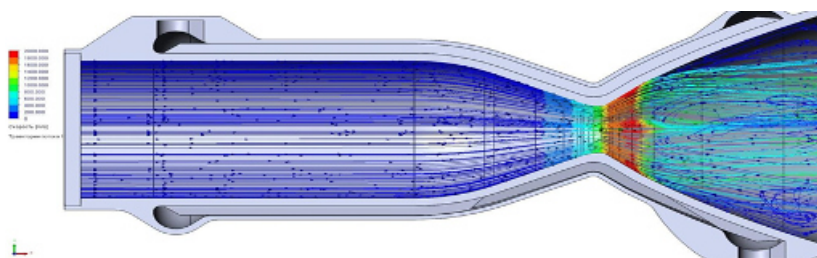


Рис. 2. Траектории продуктов сгорания камеры со степенью расширения сопла $F = 25$

Дальнейшее уменьшение степени расширения до $F = 10$ (рисунок 3) привело к качественному изменению картины течения. Расчеты показали, что отрыв потока в сверхзвуковой части сопла для данной конфигурации практически отсутствует. Поток становится

более однородным и стабильным, структура скачков уплотнения смещается к самому срезу сопла, минимизируя потери энергии. Данный вариант был признан перспективным для обеспечения надежной работы двигателя на стенде.

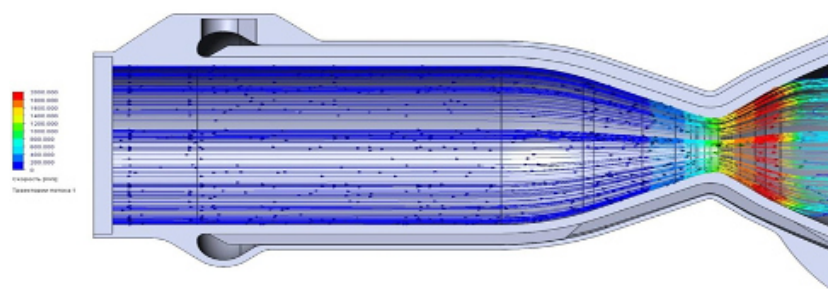


Рис. 3. Траектории продуктов сгорания камеры со степенью расширения сопла $F = 10$

Для варианта с минимальной степенью расширения $F = 5$ (рисунок 4) численное моделирование продемонстрировало полное отсутствие каких-либо признаков отрыва потока. Течение в сопле является равномерным и полностью соответствующим расчетному режиму при данных условиях. Отрыв потока в данном варианте минимален [2].

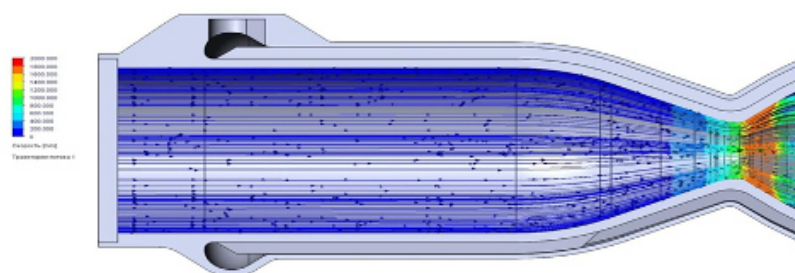


Рис. 4. Траектории продуктов сгорания камеры со степенью расширения сопла $F = 5$

На основании анализа всей совокупности полученных расчетных данных был сделан вывод, что для проведения исследовательских огневых испытаний в наземных атмосферных условиях наиболее оптимальным является образец камеры РДМТ со степенью расширения сопла $F = 5$. Данная геометрия гарантирует безотрывное течение продуктов сгорания, что позволит корректно оценить энергетические характеристики двигателя, качество смесеобразования и эффективность системы охлаждения без искажающего влияния газодинамических потерь, связанных с перерасширением.

Вместе с тем, для получения более полной картины и оценки влияния геометрии на параметры рабочего процесса было принято решение также изготовить и испытать промежуточный образец со степенью расширения $F = 10$. Данный образец позволит оценить тенденцию изменения тяговых характеристик при приближении к предельным режимам истечения [3].

С целью дальнейшего упрощения технологического цикла и повышения жесткости конструкции, было принято решение об объединении камеры и смесительной головки в монолитную конструкцию. Соответствующая 3D-модель монолитной камеры-демонстратора, подготовленная к печати, отображена на рисунке 5. Такой подход позволяет минимизировать количество сварных и резьбовых соединений, являющихся потенциальными источниками негерметичности и концентраторами напряжений, что особенно актуально для работы при высоких давлениях и температурах.

Визуализация изготовленных опытных образцов камер РДМТ с винтовыми каналами охлаждения, полученных по результатам данной оптимизационной работы, представлена на рисунке 6.

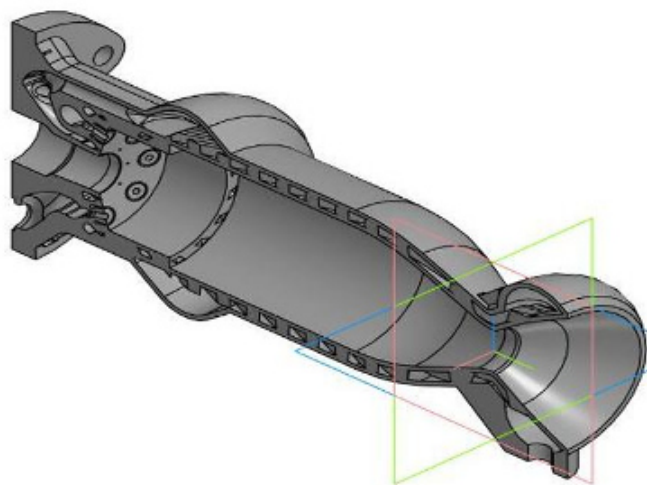


Рис. 5. Монолитная конструкция камеры двигателя для SLM-печати

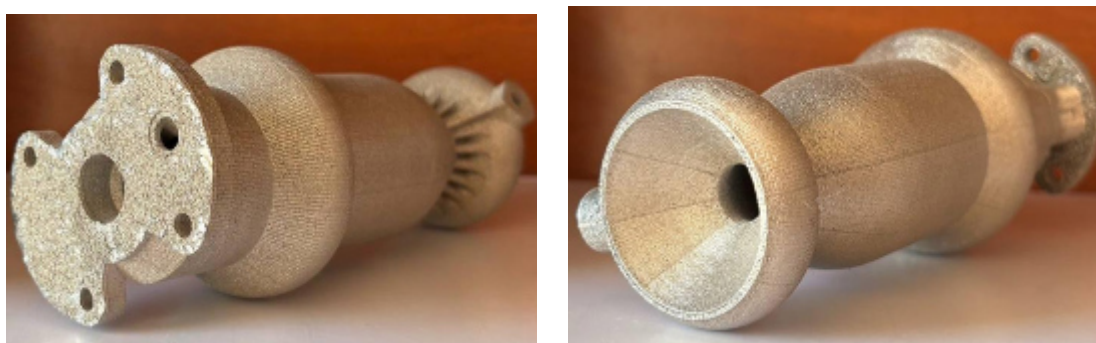


Рис. 6. Оптимизированная камера РДМТ, изготовленная методом SLM-печати

Библиографические ссылки

1. Шестерня В. И., Алексеенко В. В., Кирюшкин Г. А. Проектирование 3D-модели камеры ЖРД малой тяги с охлаждающим трактом для SLM печати // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. Красноярск, 2023. С. 250-252.
2. Шестерня В. И., Алексеенко В. В., Кирюшкин Г. А. Разработка методологии испытаний камер ракетных двигателей, изготовленных и использованием аддитивных технологий // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С. 139-141.
3. Шестерня В. И. Численное моделирование рабочего процесса образцов камеры РДМТ с различной степенью расширения сопла // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов X Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. Красноярск, 2024. С. 274-276.