

НАДЕЖНОСТЬ

ISSN 1729-2646
e-ISSN 2500-3909

ТОМ **26**, №1

2026

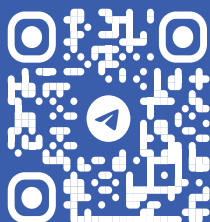
НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

В НОМЕРЕ

- МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ КАНАТА ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ, ЛЕЖАЩЕГО НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ, С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ
- TEXT MINING ЖУРНАЛА ДУ-46 С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТЕКСТА
- АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНОЙ РЕАКЦИИ НА ИНЦИДЕНТЫ: СРАВНЕНИЕ АРХАНГЕЛЬСКА И ЕКАТЕРИНБУРГА
- КОМПЛЕКСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
- ОБ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА
- МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ РЗА В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
- ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕВОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ВТОРЖЕНИЯ В IOT
- ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

НИИАС

#создаём_окна_возможностей



70
1956-2026

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПУБЛИКАЦИЙ В ЖУРНАЛЕ «НАДЕЖНОСТЬ»

СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

- Методы расчета, технологии и методы моделирования, пакеты прикладных программ, практические расчеты надежности сложных систем
- Математическая теория технического обслуживания, практические результаты эксплуатации сложных систем, жизненный цикл систем, оптимизация надежности и стоимости на этапах жизненного цикла
- Методы испытаний, критерии принятия решений по результатам испытаний, ускоренные испытания, методы оценки надежности систем по результатам испытаний

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

- Объект, предмет и цели исследования, показатели функциональной надежности, терминология, принципы и методы расчета
- Методы оценки и прогнозирования надежности программного обеспечения и программно-аппаратных комплексов с учетом сбойных, программных ошибок, ошибок операторов, ошибок во входной информации
- Технологии и методы обеспечения функциональной надежности - технологии построения функционально надежного программного обеспечения, методы построения нечувствительных к сбойным ошибкам и ошибкам операторов алгоритмов обработки информации и управления, методы и способы защиты от ошибок во входной информации, практические результаты

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ

- Показатели функциональной безопасности; функции безопасности, полнота безопасности
- Математические методы и модели задания требований к полноте безопасности и допустимому времени обнаружения опасного отказа, модели функциональной безопасности многоканальных и многоуровневых систем
- Технологии обеспечения функциональной безопасности систем на всех этапах жизненного цикла

ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ

- Методы пассивной защиты от отказов, математические модели структурного резервирования, постепенной деградации избыточных систем, маскирования неисправностей, результаты применения пассивной защиты от отказов
- Методы активной защиты от структурных отказов и ошибок в выполнении информационных процессов, принципы и способы активной защиты, теоретические основы активной защиты, технические решения, оценки эффективности активной защиты.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

- Общая теория рисков, методологические вопросы формализации рисков
- Классификация рисков объектов. Принципы и методы оценивания рисков. Методы определения допустимых уровней риска. Методология управления рисками разной природы
- Методы и модели определения интегральных рисков

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

- Аккредитация органов по сертификации и испытательных лабораторий - состояние проблемы в России и за рубежом. Пути сертификации программно-аппаратных комплексов по требованиям международных стандартов по функциональной безопасности
- Обязательная и добровольная сертификации - опыт, мнения, предложения
- Сертификация в области качества и надежности систем - требования стандартов, методики испытаний, практические результаты
- Влияние закона «О техническом регулировании» на развитие теории и практики надежности и функциональной безопасности
- Состояние и перспективы стандартизации в области надежности, отказоустойчивости и живучести, функциональной безопасности и управления рисками

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

- Методы проактивного управления надежностью и безопасностью
- Методы оценивания надежности и безопасности при неполных данных
- Нормирование показателей надежности и безопасности в больших системах
- Методы проектирования надежности и безопасности уникальных ответственных систем

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

- Показатели функциональной и технической эффективности
- Методы оценивания технической эффективности систем управления
- Технологии построения систем управления с повышенной эффективностью
- Нормативные требования к обеспечению технической эффективности систем управления

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ АКТИВАМИ

- Проблемы управления техническими активами в больших системах
- Методология управления техническими активами
- Управление техническими и техногенными рисками в больших системах
- Управление ресурсами составных объектов систем
- Оценка деятельности структурных подразделений
- Корпоративная платформа управления техническими активами

ОБРАБОТКА БОЛЬШИХ ДАННЫХ. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

- Технологии подготовки больших данных и отбора признаков для машинного обучения
- Методы и алгоритмы машинного обучения, развитие и результаты применения технологии больших данных
- Прогнозирование динамики изменения состояний систем управления
- Применение методов искусственного интеллекта в задачах надежности и безопасности

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

- Методы защиты информации в автоматизированных системах управления
- Методы обеспечения безопасности информации в программных средствах
- Системы защиты информации
- Методы и технологии комплексного обеспечения функциональной и информационной безопасности в системах управления
- Технологии подтверждения соответствия требованиям безопасности информации

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

- Методология аналитических и системных исследований в задачах надежности и безопасности
- Системные исследования управления и принятия решений. Стратегическое и оперативное управление.
- Сбор, обработка данных и прогнозирование. Статистика, теория вероятностей, комбинаторика, методы измерения и моделирования в системно-аналитических исследованиях
- Информационное обеспечение системного анализа, систем управления и принятия решений

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

- Назначение и структура современных ИТС Информационные и коммуникационные технологии и решения, востребованные при создании и эксплуатации ИТС
- Использование и развитие мирового опыта при создании российских ИТС.
- Роль и место систем безопасности в ИТС
- Нейронные системы и искусственный интеллект в ИТС
- Достоверные данные и система обнаружения
- Повышение безопасности с помощью видеоаналитики

ТЕРМИНОЛОГИЯ НАДЕЖНОСТИ, ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ, РИСКОВ И ЖИВУЧЕСТИ

- Методологические и методические вопросы исследования терминологии надежности, отказоустойчивости, безопасности, рисков и живучести
- Современный понятийный аппарат в области надежности, отказоустойчивости, безопасности, рисков и живучести
- Проблема согласования и стандартизации терминологии в области надежности, отказоустойчивости, безопасности, рисков и живучести, принятой в России, с используемой в международной практике
- Вопросы стандартизации терминологии в области надежности, отказоустойчивости, безопасности, рисков и живучести

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Шубинский Игорь Борисович – доктор технических наук, профессор, главный эксперт, АО «НИИАС» (Москва, Россия)

Заместители главного редактора:

Бочков Александр Владимирович – доктор технических наук, ученый секретарь, АО «НИИАС» (Москва, Россия)

Шебе Хендрик – доктор естественных наук, главный эксперт по надежности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности, TÜV Rheinland InterTraffic (Кёльн, Германия)

Ястребенецкий Михаил Анисимович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела Национальной академии наук Украины «Государственный научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности» (Харьков, Украина)

Технический редактор:

Новожилов Евгений Олегович – кандидат технических наук, главный специалист Департамента технической политики ОАО «РЖД» (Москва, Россия)

Председатель редакционного совета:

Розенберг Ефим Наумович – доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора, АО «НИИАС» (Москва, Россия)

Сопредседатель редакционного совета:

Махутов Николай Андреевич – доктор технических наук, профессор, член – корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова, председатель Рабочей группы при Президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Аврамович Зоран Ж. – доктор технических наук, профессор, профессор Института транспорта Университета г. Белград (Белград, Сербия)

Алиев Вугар Амирович – доктор физико-математических наук, профессор, Генеральный директор компании AMIR Technical Services (Баку, Азербайджан)

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управления и защиты информации» Российского университета транспорта (МИИТ) (Москва, Россия)

Бочков Константин Афанасьевич – доктор технических наук, профессор, научный руководитель – заведующий НИЛ «Безопасность и ЭМС технических средств (БЭМС ТС), УО «Белорусский государственный университет транспорта» (Гомель, Республика Беларусь)

Боян Димитров – профессор, доктор математических наук, профессор теории вероятности и статистики, университет Кеттеринга, Флинт (Мичиган, США)

Вэй Куо – ректор и заслуженный профессор, профессор электротехники, компьютерного анализа данных, ядерной техники, городской университет Гонконга, Член Национальной инженерной академии США (Гонконг, Китай)

Гапанович Валентин Александрович – кандидат технических наук, президент Ассоциации «Объединение производителей железнодорожной техники» (Москва, Россия)

Каштанов Виктор Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор департамента прикладной математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

Климов Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, начальник управления 4 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны РФ (Москва, Россия)

Кофанов Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

Кришнамурти Ачътха – доктор физико-математических наук, профессор, почетный профессор Департамента математики Университета науки и технологий (Кочин, Индия)

Лецкий Эдуард Константинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Цифровые технологии управления транспортными процессами» Российского университета транспорта (МИИТ) (Москва, Россия)

Манджей Рам – профессор, доктор, отделение математики, вычислительной техники и технических наук, Университет Graphic Era, (Дехрадун, Индия)

Нетес Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) (Москва, Россия)

Папич Любиша – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра по управлению качеством и надёжностью (DQM), (Приевор, Сербия)

Поляк Роман А. – доктор физико-математических наук, профессор, приглашенный профессор Школы математических наук технологического Университета Технион (Хайфа, Израиль)

Рыков Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Прикладной математики и компьютерного моделирования РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, профессора кафедры Теории вероятностей и кибербезопасности РУДН (Москва, РФ)

Соколов Борис Владимирович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), (Санкт-Петербург, Россия)

Тимашев Святослав Анатольевич – доктор технических наук, профессор, научный руководитель и главный научный сотрудник НИЦ «Надежность и безопасность больших систем и машин» Уральского Отделения РАН РФ (Екатеринбург, Россия)

Уткин Лев Владимирович – доктор технических наук, профессор Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Первого (Санкт-Петербург, Россия)

Юркевич Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор, Главный научный сотрудник лаборатории Технической диагностики и отказоустойчивости ИПУ РАН. (Москва, Россия)

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Журнал «Надежность»

*Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Регистрационное свидетельство
ПИ № ФС77-46055 от 05 августа 2011 года.
Официальный печатный орган Российской академии надежности*

Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140, г. Москва, ул. Русаковская, д. 13, стр. 5, 2 этаж, пом. П/6-7

Издатель журнала

ООО «Журнал «Надежность»

Генеральный директор

Саламатин Д.А.

Адрес: 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1
ООО «Журнал «Надежность»
www.dependability.ru
телефон редакции 8 (495) 967-77-05,
e-mail: dependability@bk.ru

Подписано в печать 11.03.2025

Объем 88, Тираж 500 экз, Заказ № 19620
Формат 60x90/8, Бумага глянец

Журнал издается ежеквартально с 2001 года. Стоимость* подписки на бумажную версию* (без стоимости доставки) на 2026 год:
– на год (4 выпуска) – 6 600 руб.;;
– на полугодие (2 выпуска) – 3 300 руб.;;
– цена одного номера – 1 650 руб.

* Указана стоимость с учетом НДС по ставке 10%
Статьи рецензируются.

Статьи опубликованы в авторской редакции.

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ» (АО «НИИАС»)

Журнал разносторонне освещает проблемы надёжности, отказоустойчивости, безопасности, рисков, живучести, интеллектуального управления транспортом и активами.

Рубрики журнала

- Структурная надёжность
- Функциональная надёжность
- Функциональная безопасность систем
- Отказоустойчивость систем
- Управление рисками
- Сертификация и стандартизация
- Инновационные технологии в области надёжности и безопасности
- Техническая эффективность систем управления
- Управление техническими активами
- Обработка больших данных. Системы управления и искусственный интеллект
- Методы и системы защиты информации
- Системный анализ в задачах надёжности и безопасности
- Интеллектуальные транспортные системы
- Терминологические вопросы надёжности, отказоустойчивости, безопасности, рисков и живучести
- Сообщения

Рецензируемый научно-практический журнал «Надёжность» включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата и доктора наук по следующим специальностям и соответствующим им отраслям науки:

1.2. **Компьютерные науки и информатика** (1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение (физико-математические науки), 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические, технические науки))

2.3. **Информационные технологии и телекоммуникации** (2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки), 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки), 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки), 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки))

2.9. **Транспортные системы** (2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки), 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки), 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки))

Журнал «Надёжность» входит в категорию К2 перечня рецензируемых научных изданий ВАК, принятого в соответствии с рекомендацией Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России от 21 декабря 2023 № 3-пл/1 «О категорировании перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительная статья от редколлегии	3
<i><u>Вопросы автоматизации и управления процессами на транспорте</u></i>	
Литвинов В.Л., Шамолин М.В., Литвинова К.В. Моделирование колебаний и исследование резонансных свойств каната переменной длины, лежащего на упругом основании, с учетом диссипации.....	4
Канарский В.А. Text mining журнала ДУ-46 с применением частотных методов обработки текста.....	12
Малютина Е.В. Анализ социальной реакции на инциденты: сравнение Архангельска и Екатеринбурга	21
Воронин А.А. Комплексное обеспечение безопасности объектов транспортной инфраструктуры.....	30
<i><u>Системный анализ, управление и обработка информации, статистика</u></i>	
Полтавский А.В., Ахобадзе Г.Н. Об одной математической модели оценки надёжности и обеспечении безопасности полетов при эксплуатации беспилотного воздушного судна.....	37
Кириллов Л.Р., Лужавин Ю.И. Методика оценки безотказности РЭА в условиях меняющейся температуры окружающей среды	44
<i><u>Методы и системы защиты информации, информационная безопасность</u></i>	
Нианг П.М., Сидоренко В.Г. Применение ансамблевого обучения для определения типа вторжения в IoT	49
<i><u>Применение искусственного интеллекта в задачах надёжности и безопасности</u></i>	
Нетес В.А. Применение искусственного интеллекта для обеспечения надёжности	62
Хаим Борисович Кордонский (1919-1999): ученый, опередивший время	70
Форум Б.В.Гнеденко	76

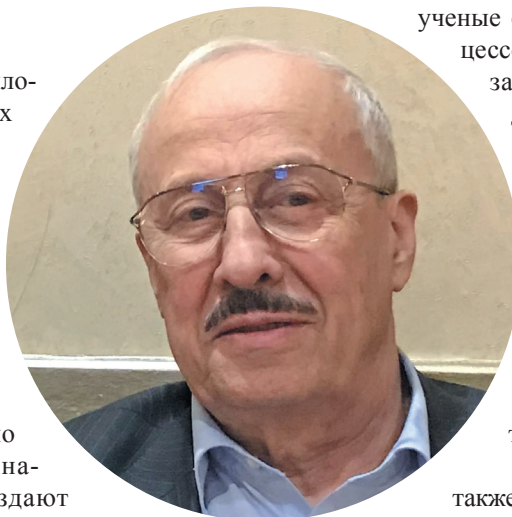
Уважаемые коллеги!

Прошедший 2025 год изобиловал множеством политических событий, многие из которых принесли миру террор, насилие, войны, разрушения. Несмотря на усилия ведущих мировых держав, не удалось достичь мира в Европе. Эта проблема остается центральной в текущем 2026 году.

На фоне негативных политических событий особенно впечатляют замечательные научные достижения. Они создают уверенность в поступательном прогрессе, в возможности сформировать созидательное общество, свободное от насилия и разрушений. Прошедший 2025 год – это год новых открытий в области медицины, физики, биологии, социологии и, конечно, техники. Прежде всего, следует отметить, что в 2025 году технология искусственного интеллекта нашла массовое применение. Были разработаны применительно к нейронным сетям эффективные алгоритмы фильтрации и обработки информации. Получили мощное развитие прикладные методы искусственного интеллекта и, что особенно важно, эта технология получила всестороннюю поддержку на правительственном уровне ведущих мировых держав.

Большой научный прогресс произошел в отношении элементной базы технических средств, в создании сверхбыстродействующих систем обработки информации и управления. Так, созданы сильно растяжимые светодиоды для гибких экранов на основе полупроводниковых наноматериалов. Создан квантовый чип Majorana 1, на котором размещён миллион кубитов. В чипе используется первый в мире топологический проводник. Создана батарея с жидкими электродами на основе проводящих полимеров и лигнина, способная принять любую форму которую можно формовать как пластилин или печатать на 3D-принтере. Создан лазер для оптоволоконной связи на основе квантовых точек.

В квантовых технологиях 2025 год выделится крупными достижениями. Исследователи впервые смогли передать квантовое состояние от одного квантового компьютера к другому – не копируя его, а именно телепортируя это состояние. По сути,



ученые соединили два квантовых процессора с помощью света и явления запутанности – когда частицы, даже находясь на расстоянии, ведут себя взаимосвязано. Это впервые показывает, что квантовые компьютеры могут быть объединены в настоящую распределенную квантовую сеть. В будущем это станет основой квантового Интернета, где данные будут передаваться без утраты квантовой информации.

Прорывные результаты получены также на транспорте в отношении беспилотного управления движущимися воздушными, морскими и наземными объектами. На железнодорожном транспорте успешно реализуется автовождение поездов с помощью средств технического зрения. Получены впечатляющие результаты в создании и промышленном производстве технических средств для высокоскоростного движения в различных климатических условиях, в развитии алгоритмов управления высокоскоростным движением.

Практическая реализация отмененных и других новых научных достижений в области технических средств, устройств и систем возможна при условии обеспечения приемлемых уровней их надежности и безопасности. Управление надежностью и безопасностью эффективно на основе оценки рисков.

Редколлегия журнала призывает к публикации оригинальных материалов авторов, а также аналитических статей в области надежности, функциональной и информационной безопасности, управления рисками, применения технологии искусственного интеллекта в задачах прогнозирования надежности и безопасности, в системах управления, новых результатов по управлению интеллектуальными транспортными системами, а также в части сертификации и стандартизации новых устройств, систем и технологий.

Уважаемые авторы! Редколлегия журнала приветствует в 2026 году ваши статьи, соответствующие заявленным в журнале разделам и специальностям ВАК. Желаем здоровья, и больших творческих достижений!

*Главный редактор журнала «Надежность»,
профессор, д.т.н. Шубинский И.Б.*

Моделирование колебаний и исследование резонансных свойств каната переменной длины, лежащего на упругом основании, с учетом диссипации

Simulation of oscillations and study of resonant properties of a rope of variable length lying on an elastic foundation, taking into account dissipation

Литвинов В.Л.^{1*}, Шамолин М.В.², Литвинова К.В.²
Litvinov V.L.^{1*}, Shamolin M.V.², Litvinova K.V.²

¹ Самарский государственный технический университет, Российская Федерация, Самара

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, Москва

¹ Samara State Technical University, Russian Federation, Samara

² Lomonosov Moscow State University, Russian Federation, Moscow

* vladlitvinov@rambler.ru



Литвинов В.Л.



Шамолин М.В.



Литвинова К.В.

Резюме. В настоящее время вопросы надежности при проектировании технических систем с подвижными границами требуют все более полного учета динамических явлений в них. **Цель.** Целью исследования является разработка математической модели и приближенно-аналитического метода для изучения поперечных колебаний и резонансных свойств вязкоупругого каната переменной длины, лежащего на упругом основании, с учетом диссипации энергии. Актуальность работы обусловлена широким распространением технических систем с подвижными границами (подъемные механизмы, гибкие передачи, контактные сети железных дорог, рельсовые пути, ленточные конвейеры, бурильные колонны и т.д.), для которых динамические нагрузки и резонанс представляют опасность. Существующие методы не позволяют полностью учесть комплекс факторов: изменение длины объекта, сопротивление среды, упругие свойства основания и внутреннее трение. **Методы.** Для решения задачи применен метод Канторовича-Галеркина, эффективный для систем с движущимися границами. Исходная краевая задача для уравнения в частных производных была сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Процедура решения включала переход к безразмерным переменным, выбор координатных функций в виде собственных форм и применение процедуры Галеркина. Для анализа нестационарных процессов использовался метод малого параметра. В рассмотренной модели сила сопротивления движению каната принимается пропорциональной скорости, а также учитывается изгибная жесткость конструкции. **Результаты.** Приведены расчетные выражения для амплитуды колебаний, соответствующих n -й динамической моде. Особое внимание уделено исследованию явлений установившегося резонанса и прохождения через резонанс. Решение охватывает наиболее распространенный на практике случай действия внешних возмущений на движущейся границе системы. Установлено, что амплитуда существенно зависит от скорости движения границы, параметров диссипации и жесткости основания. Определены условия установившегося резонанса при определенном соотношении частоты внешнего воздействия и собственной частоты системы. Исследовано явление прохождения через резонанс. Полученные аналитические выражения верифицированы сравнением с известными частными случаями, что подтвердило корректность метода с погрешностью до 5% для основных мод. **Выводы.** Полученные аналитические выражения для амплитуды колебаний, условий установившегося резонанса и параметров прохождения через резонанс позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций для инженеров-конструкторов, направленных на повышение надежности и долговечности технических систем с подвижными границами, предупреждение резонансных отказов в системах переменной длины. Ключевыми прикладными задачами, решаемыми с помощью данной модели, являются оценка усталостной долговечности, прогнозирование остаточного ресурса и предотвращение аварийных ситуаций. Учет диссипации и упругого основания критически важен для оценки резонансных свойств. Для предотвращения резонанса рекомендовано оптимизировать скорость движения границы, применять материалы с повышенным трением или демпферы, увеличивать жесткость основания. Результаты имеют прикладное значение для повышения надежности систем с подвижными границами. Перспективы исследований связаны с учетом нелинейных эффектов и негармонических воздействий.

Abstract. Currently, matters of dependability in the design of technical systems with moving boundaries require an increasingly complete consideration of underlying dynamic phenomena. **Aim.** The aim of the study is to develop a mathematical model and an approximate analytical method for studying the transverse vibrations and resonant properties of a viscoelastic rope of variable length lying on an elastic foundation, taking into account energy dissipation. The relevance of the work is due to the widespread use of technical systems with moving boundaries (lifting mechanisms, flexible transmissions, railway contact networks, rail tracks, belt conveyors, drill strings, etc.), for which dynamic loads and resonance are dangerous. The existing methods do not allow for a complete consideration of a system of factors, i.e., changes in the object's length, resistance of the medium, elastic properties of the foundation and internal friction. **Methods.** To solve the problem, the Kantorovich–Galerkin method, effective for systems with moving boundaries, was applied. The original boundary value problem for a partial differential equation was reduced to a system of ordinary differential equations. The solution procedure included the transition to dimensionless variables, the selection of coordinate functions in the form of eigenmodes and the application of the Galerkin procedure. The small parameter method was used to analyze non-stationary processes. In the considered model, the drag force of the rope movement is assumed to be proportional to the velocity, and the bending rigidity of the structure is also taken into account. **Results.** Calculation expressions are presented for the amplitude of oscillations corresponding to the n -th dynamic mode. Particular attention is paid to the study of the phenomena of steady-state resonance and passage through resonance. The solution covers the most common case in practice of the action of external disturbances on the moving boundary of the system. It is established that the amplitude significantly depends on the velocity of the boundary, dissipation parameters and the rigidity of the foundation. The conditions for steady-state resonance are determined for a certain ratio of the frequency of the external influence and the natural frequency of the system. The phenomenon of passage through resonance is studied. The resulting analytical expressions were verified by comparison with known special cases, confirming the method's validity with an error of up to 5% for the fundamental modes. **Conclusions.** The resulting analytical expressions for the oscillation amplitude, steady-state resonance conditions, and resonance passage parameters enable the formulation of a number of practical recommendations for design engineers aimed at increasing the dependability and durability of technical systems with moving boundaries and preventing resonant failures in variable-length systems. Key applied problems solved using this model include fatigue life assessment, residual life prediction, and emergency prevention. Consideration of dissipation and an elastic foundation is critical for assessing resonant properties. To prevent resonance, it is recommended to optimize the boundary velocity, use materials with increased friction or dampers, and increase the foundation rigidity. The results have practical significance for improving the dependability of systems with moving boundaries. Research prospects are related to taking into account nonlinear effects and non-harmonic influences.

Ключевые слова: колебания систем с движущимися границами, вязкоупругость, надежность систем переменной длины, упругое основание, сопротивление среды, резонансные свойства, амплитуда колебаний.

Key words: oscillations of systems with moving boundaries, viscoelasticity, dependability of variable-length systems, elastic foundation, resistance of the medium, resonant properties, oscillation amplitude.

Для цитирования: Литвинов В.Л., Шамолин М.В., Литвинова К.В. Моделирование колебаний и исследование резонансных свойств каната переменной длины, лежащего на упругом основании, с учетом диссипации // Надежность. 2026. №1. С. 4-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-4-11>

For citation: Litvinov, V.L., Shamolin, M.V., Litvinova, R.V. Simulation of oscillations and study of resonant properties of a rope of variable length lying on an elastic foundation, taking into account dissipation. Dependability 2026;1: 4-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-4-11>

Поступила: 23.10.2025 / **После доработки:** 06.12.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 23.10.2025 / **Revised on:** 06.12.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

Широкое распространение технических систем с подвижными границами – от чувствительных элементов измерительных приборов до бурильных колонн и систем с упруго–инерционными основаниями – выдвигает на первый план проблемы обеспечения их надежности. Разработка точных методов математического моделирования динамики таких систем имеет ключевое значение для прогнозирования долговечности, оценки усталостной прочности и предотвращения отказов несущих конструкций горнодобывающих машин, подъемно–транспортных механизмов, а также буксирно–тралового оборудования. Данное исследование является особенно актуальным в контексте новых прикладных задач, таких как баллистика гибких нитей, где точный расчет динамических нагрузок напрямую определяет надежность и безопасность эксплуатации специализированных технических систем. Системы с подвижными границами широко используются в различных областях техники, включая подъемные механизмы [1–4], гибкие передачи [5], железнодорожные контактные сети [6], рельсовые пути [7], ленточные конвейеры [8] и др. Анализ явлений установившегося резонанса и явления прохождения через резонанс имеет особое практическое значение, поскольку эти режимы представляют значительный риск для работы механических систем. Однако наличие подвижных границ существенно усложняет математическое моделирование таких систем [9]. Точные аналитические методы применимы, прежде всего, к волновому уравнению с простыми граничными условиями [10–11]. Среди приближенных методов наиболее эффективным является метод Канторовича–Галеркина [12, 13], учитывающий: силы сопротивления среды [14], изгибную жесткость [12, 15], вязкоупругие свойства материала [15] и жесткость подложки [10]. Полученные аналитические выражения для амплитуды колебаний, условий установившегося резонанса и параметров прохождения через резонанс позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций, направленных на повышение надежности и долговечности технических систем с подвижными границами.

1. Математическая постановка задачи

Дифференциальное уравнение, описывающее колебания каната, имеет вид:

$$U_{tt}(x, t) - a^2 U_{xx}(x, t) + \frac{\lambda}{\rho} U_t(x, t) + \frac{EI}{\rho} U_{xxxx}(x, t) + \frac{\mu I}{\rho} U_{xxxx}(x, t) + \frac{k_0}{\rho} U(x, t) = 0. \quad (1)$$

Граничные условия с возмущением гармонического вида на движущейся границе можно записать следующим образом:

$$U(0, t) = 0; U_{xx}(0, t) = 0; \quad (2)$$

$$U(l_0(t), t) = B \cos W_0(\omega_0 t); U_x(l_0(t), t) = 0. \quad (3)$$

Начальные условия в данной задаче опущены, поскольку они не влияют на резонансные свойства для линейных систем [12].

Обозначения:

$U(x, t)$ – поперечное смещение; E – модуль упругости каната; I – осевой момент инерции; μ – коэффициент вязкоупругости; λ – коэффициент сопротивления среды; ρ – линейная плотность; k_0 – жесткость подложки; $a = \sqrt{T/\rho}$ – минимальная скорость распространения волн; T – сила натяжения; $l_0(t) = L_0 - v_0 t$ – закон движения границы; L_0 – начальная длина каната; $W_0(z)$ – функция класса C^1 ; B, ω_0 – константы.

После перехода к безразмерным переменным

$$\xi = \omega_0 x / a; \tau = \omega_0 t + \frac{\omega_0 L_0 - a}{-v_0}; U(x, t) = Bu(\xi, \tau)$$

и новой функции

$$u(\xi, \tau) = e^{-\alpha \tau} V(\xi, \tau), \text{ где } \alpha = \lambda / (2\omega_0 \rho),$$

система принимает вид:

$$V_{\tau\tau}(\xi, \tau) - V_{\xi\xi}(\xi, \tau) - \sigma^2 V(\xi, \tau) + (\beta^2 - \alpha\gamma^2) V_{\xi\xi\xi\xi}(\xi, \tau) + \gamma^2 V_{\xi\xi\xi\xi\tau}(\xi, \tau) = 0; \quad (4)$$

$$V(0, \tau) = 0; V_{\xi\xi}(0, \tau) = 0; \quad (5)$$

$$V(l(\varepsilon\tau), \tau) = e^{\alpha\tau} \cos W(\tau); V_{\xi}(l(\varepsilon\tau), \tau) = 0, \quad (6)$$

где

$$\beta^2 = \frac{EI}{\rho} \frac{\omega_0^2}{a^4}; \gamma^2 = \frac{\mu I}{\rho} \frac{\omega_0^3}{a^4}; l(\varepsilon\tau) = 1 + \varepsilon\tau;$$

$$\sigma^2 = \alpha^2 - \frac{k_0}{\rho\omega_0^2}; W(\tau) = W_0(\tau - \gamma_0);$$

$$\gamma_0 = \frac{\omega_0 L_0 - a}{-v_0}; \varepsilon = -v_0 / a.$$

2. Методы решения задачи

Для решения задачи (4)–(6) используем метод Канторовича–Галеркина [12, 13]. Решение будем искать в виде:

$$V(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n(\tau) X_n(\xi, \varepsilon\tau).$$

Обозначим $\delta^2 = (\beta^2 - \alpha\gamma^2)$ и $\Omega_{0n}^2(\varepsilon\tau) = \omega_{0n}^2(\varepsilon\tau) - \sigma^2$, где $\omega_{0n}(\varepsilon\tau)$ – собственные частоты задачи (4)–(6).

Из решения задачи:

$$\delta^2 X_{n\xi\xi\xi\xi}(\xi, \varepsilon\tau) - X_{n\xi\xi}(\xi, \varepsilon\tau) - \omega_{0n}^2(\varepsilon\tau)X_n(\xi, \varepsilon\tau) = 0;$$

$$X_n(0, \varepsilon\tau) = 0; X_{n\xi\xi}(0, \varepsilon\tau) = 0;$$

$$X_n(l(\varepsilon\tau), \varepsilon\tau) = 0; X_{n\xi}(l(\varepsilon\tau), \varepsilon\tau) = 0$$

найдем выражение для динамических мод $X_n(\xi, \varepsilon\tau)$ и функций $\omega_{0n}(\varepsilon\tau)$:

$$X_n(\xi, \varepsilon\tau) = A_n \{ \sin[k_1(\varepsilon\tau)\xi] + c_n(\varepsilon\tau) \operatorname{sh}[k_2(\varepsilon\tau)\xi] \};$$

$$\omega_{0n}(\varepsilon\tau) = [\omega_{1n}(\varepsilon\tau) + d_n(\varepsilon\tau)] \sqrt{1 + \delta^2 [\omega_{1n}(\varepsilon\tau) + d_n(\varepsilon\tau)]^2},$$

где

$$A_n = 1 / \max \{ \sin[k_1(\varepsilon\tau)\xi] + c_n(\varepsilon\tau) \operatorname{sh}[k_2(\varepsilon\tau)\xi] \};$$

$$k_1(\varepsilon\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\delta}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + 4\delta^2 \omega_{0n}^2(\varepsilon\tau)}};$$

$$k_2(\varepsilon\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\delta}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 4\delta^2 \omega_{0n}^2(\varepsilon\tau)}};$$

$$c_n(\varepsilon\tau) = -\frac{\sin[k_1(\varepsilon\tau)l(\varepsilon\tau)]}{\operatorname{sh}[k_2(\varepsilon\tau)l(\varepsilon\tau)]}; \omega_{1n}(\varepsilon\tau) = \frac{\pi n}{l(\varepsilon\tau)};$$

$$d_n(\varepsilon\tau) = \frac{1}{l(\varepsilon\tau)} \operatorname{arctg} \frac{\delta \omega_{1n}(\varepsilon\tau)}{\sqrt{1 + \delta^2 \omega_{1n}^2(\varepsilon\tau)}}.$$

Предположим $\mu_n(\tau) = A_{0n}(\varepsilon\tau)y_n(\tau)$, где функция $y_n(\tau)$ удовлетворяет следующему уравнению, записанному с точностью до порядка ε^2 :

$$y_n''(\tau) + \Omega_{0n}^2(\varepsilon\tau)y_n(\tau) = -\frac{\omega_{0n}^2(\varepsilon\tau)Q_{n21}(\varepsilon\tau)}{A_{0n}(\varepsilon\tau)} e^{\alpha\tau} \cos W(\tau). \quad (7)$$

Выполнив вычисления, получаем для функций $Q_{n21}(\varepsilon\tau)$, A_{0n} :

$$Q_{n21}(\varepsilon\tau) = \frac{-k_1(\varepsilon\tau)\sqrt{1 + 4\delta^2 \omega_{0n}^2(\varepsilon\tau)}}{\omega_{0n}^2(\varepsilon\tau)A_{1n}(\varepsilon\tau)} \cos[k_1(\varepsilon\tau)l(\varepsilon\tau)];$$

$$A_{0n}(\varepsilon\tau) = 1 / \sqrt{A_{1n}(\varepsilon\tau)};$$

$$A_{1n}(\varepsilon\tau) = \frac{1}{2} l(\varepsilon\tau) [1 - c_n^2(\varepsilon\tau)] - \frac{\sin[2k_1(\varepsilon\tau)l(\varepsilon\tau)]}{4k_2(\varepsilon\tau)\omega_{0n}(\varepsilon\tau)\delta}.$$

Линейно независимые решения однородного уравнения, соответствующего неоднородному уравнению (7), имеют вид:

$$y_{1n}(\tau) = a_n(\varepsilon\tau) \cos w_n(\tau); y_{2n}(\tau) = a_n(\varepsilon\tau) \sin w_n(\tau).$$

Метод малого параметра позволяет получить выражения для $a_n(\varepsilon\tau)$ и $w_n(\tau)$:

$$a_n(\varepsilon\tau) = 1 / \sqrt{\Omega_{0n}(\varepsilon\tau)}; w_n(\tau) = \int_0^\tau \Omega_{0n}(\varepsilon\zeta) d\zeta.$$

3. Результаты. Сделанные предположения.

После преобразований с учетом (6) получим выражение для амплитуды колебаний, соответствующих n -ной динамической моде [12]:

$$A_n^2(\tau) = E_n^2(\varepsilon\tau) \left\{ \left[\int_0^\tau F_n(\varepsilon\zeta) \cos \Phi_n(\zeta) d\zeta \right]^2 + \left[\int_0^\tau F_n(\varepsilon\zeta) \sin \Phi_n(\zeta) d\zeta \right]^2 \right\},$$

где

$$E_n^2(\varepsilon\tau) = \frac{e^{-2\alpha\tau}}{4A_{1n}(\varepsilon\tau)\Omega_{0n}(\varepsilon\tau)};$$

$$\Phi_n(\zeta) = w_n(\zeta) - W_n(\zeta);$$

$$F_n(\varepsilon\zeta) = \omega_{0n}^2(\varepsilon\zeta) Q_{n21}(\varepsilon\zeta) e^{\alpha\zeta} \sqrt{A_{1n}(\varepsilon\zeta) / \Omega_{0n}(\varepsilon\zeta)}.$$

Установившийся резонанс наблюдается при:

$$W_n(\tau) = w_n(\tau) + \gamma, \text{ где } \gamma - \text{ константа.}$$

Амплитуда при этом имеет вид

$$A_n(\tau) = E_n(\varepsilon\tau) \int_0^\tau F_n(\varepsilon\zeta) d\zeta.$$

Явление прохождения через резонанс может возникнуть на любой из динамических мод при воздействии на систему гармонического возмущения с частотой ω_0 когда $W(\tau) = \tau$.

Точка резонансной области τ_0 приближенно определяется по следующей формуле:

$$\tau_0 = \frac{1}{\varepsilon} \left[\sqrt{\frac{2\delta^2}{-1 + \sqrt{1 + 4\delta^2(1 + \sigma^2)}}} \cdot \pi n - 1 \right].$$

Выражение для максимально возможной амплитуды при прохождении через резонанс имеет вид:

$$A_n^2(\tau_1, \tau_2) = E_n^2(\varepsilon\tau_2) \left\{ \left[\int_{\tau_1}^{\tau_2} F_n(\varepsilon\zeta) \cos \Phi_n(\zeta) d\zeta \right]^2 + \left[\int_{\tau_1}^{\tau_2} F_n(\varepsilon\zeta) \sin \Phi_n(\zeta) d\zeta \right]^2 \right\}.$$

Предлагаемая модель и полученное решение имеют следующие допущения и ограничения:

1. Линейность модели: Модель предполагает линейную зависимость сил сопротивления от скорости

и вязкоупругости материала. Это ограничивает ее применимость областями малых деформаций и умеренных скоростей.

2. Гармоническое возмущение: Решение для резонансных мод получено для случая гармонического внешнего воздействия на границе. Для ударных или широкополосных случайных воздействий требуется дальнейшее развитие модели.

3. Одномерность: Модель рассматривает исключительно поперечные колебания, пренебрегая продольно-поперечной связью, которая может стать существенной при больших амплитудах.

4. Простота закона движения границы $l(\tau)$: Метод допускает различные законы движения границ, но представленные аналитические результаты наиболее наглядны для плавных и монотонных изменений длины. Резкие изменения длины могут потребовать численного анализа.

Принятие во внимание этих ограничений дает направления для дальнейших исследований, таких как включение нелинейных членов в уравнение и использование численных аналитических методов.

4. Обсуждение полученных результатов и сравнение их с ранее известными

Для проверки предложенной модели в частном случае, когда сопротивление среды и вязкоупругие свойства пренебрежимо малы, а жесткость основания постоянна, полученные зависимости для амплитуд колебаний при установившемся резонансе и прохождении через резонанс, а также форм колебаний были сопоставлены с результатами, представленными в [11, 12]. Наблюдается полное качественное и количественное совпадение для основных форм колебаний, что подтверждает корректность примененного метода Канторовича–Галеркина (погрешность не превышает 5% при $\varepsilon < 0,37$). В случае учета только демпфирующих сил модель согласуется с результатами, представленными в [16].

5. Прикладные аспекты и формулировка рекомендаций

Полученные аналитические выражения для амплитуды колебаний $A_n(\tau)$, условий установившегося резонанса и параметров прохождения через резонанс позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций, направленных на повышение надежности и долговечности технических систем с подвижными границами. Ключевые прикладные задачи, решаемые с помощью данной модели, включают оценку усталостной долговечности, прогнозирование остаточного ресурса и предотвращение аварийных ситуаций.

Для инженерной оценки усталостной долговечности элемента переменной длины и прогнозирования ресурса предлагается следующий подход:

1. На основе кинематического закона движения границы $l(\tau)$ определить моменты времени τ_1 , τ_2 и параметры, при которых система проходит резонансные области.

2. Используя выражение для максимальной амплитуды $A_n(\tau_1, \tau_2)$ при прохождении через резонанс, рассчитать максимальные динамические напряжения в системе с учетом ее геометрических и жесткостных характеристик.

3. Количество циклов нагружения, соответствующих каждому прохождению через резонанс, можно оценить по количеству смен знака напряжений за время нахождения системы в резонансной области.

4. Суммируя повреждения по всем резонансным режимам за характерный рабочий цикл, можно оценить накопление усталостных повреждений и спрогнозировать остаточный ресурс конструкции.

Для предотвращения возникновения опасных резонансных явлений на этапе проектирования рекомендуется следующее:

1. Контроль скорости движения границы: Зная собственные частоты системы ω_{0n} в критических точках (например, на минимальной и максимальной длинах), следует выбирать закон изменения скорости движения границы $l(\tau)$, обеспечивающий минимизацию времени нахождения вблизи условий прохождения через резонанс и максимизацию скорости изменения обобщенной частоты.

2. Оптимизация демпфирования: Поскольку амплитуда резонансных колебаний обратно пропорциональна коэффициенту демпфирования β , выбор материалов с повышенным внутренним трением или установка внешних демпферов является эффективной мерой подавления колебаний.

3. Учет жесткости основания: Расчеты показывают, что увеличение безразмерного параметра k_0 , характеризующего жесткость упругого основания, приводит к увеличению собственных частот ω_{0n} . Это позволяет вывести низшие формы колебаний из рабочего диапазона частот внешних возмущений, характерных для данного объекта.

Выводы

Таким образом, разработанные математическая модель и методы решения представляют не только теоретический интерес, но и практическое значение для расчета и оптимизации динамических характеристик вязкоупругих канатов, лежащих на упругом основании, с учетом диссипации, что позволяет более точно прогнозировать их поведение в резонансных условиях. Сформулированные на этой основе рекомендации по выбору кинематических и жесткостных параметров системы позволяют на стадии проектирования предотвратить возможность возникновения значительных амплитудных колебаний в несущих элементах установок, а также открывают перспективы для дальнейших исследований, в том числе с учетом

нелинейных свойств материала, продольно–поперечных колебаний каната и т.д. Представленные решения могут быть использованы при исследовании колебаний механических объектов с подвижными границами (см. также [16–27]) в целях повышения надежности и увеличения срока службы технических систем переменной длины.

Список литературы

1. Весницкий А.И., Потапов А.И. Поперечные колебания канатов в шахтных подъемниках // Динамика систем. Горьковский университет. 1975. № 7. С. 84-89.
2. Колосов Л.В. Продольно-поперечные колебания струны каната подъемной установки // Изв. вузов: Горный журнал. 1981. № 3. С. 83-86.
3. Литвинов В.Л. Исследование прохождения через резонанс вязкоупругого каната переменной длины в грузоподъемных механизмах // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2008: XI Всероссийская научно-техническая конференция. Пермь, 2008.
4. Zhu W.D., Chen Y. Theoretical and experimental investigation of elevator cable dynamics and control // Trans. ASME. J. Vibr. and Acoust. 2006. Vol. 1. Pp. 66-78.
5. Самарин Ю.П., Анисимов В.Н. Вынужденные поперечные колебания гибкого звена при разгоне // Изв. вузов. Машиностроение. 1986. № 12. С. 17-21.
6. Ryue J., Thompson D. Decay rates of propagating waves in railway tracks at high frequencies // J. Sound and Vibr. 2009. № 4-5. Pp. 955-976.
7. Lei Xiao-yun. Влияние резких изменений жесткости основания железнодорожного полотна на его вибрацию при движущейся нагрузке // Journal of Vibration Engineering. 2006. № 2. Pp. 195-199.
8. Мулухов К.К. Особенности динамического расчета ленточно-колесных конвейеров // Труды Северо-Кавказского государственного технологического университета. 2000. № 7. С. 266-269: 3 ил.
9. Самарин Ю.П. О волновых явлениях в областях с подвижными границами // Волжский математический сборник. Куйбышев, 1967. Вып. 5. С. 337-340.
10. Весницкий А.И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
11. Анисимов В.Н., Литвинов В.Л., Корпен И.В. Об одном методе получения аналитического решения волнового уравнения, описывающего колебания систем с движущимися границами // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Физико-математические науки». 2012. № 3(28). С. 145-151. DOI: 10.14498/vsgtu1079 EDN: QBUTVH
12. Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Резонансные свойства механических объектов с движущимися границами: монография // Самар. гос. техн. ун-т, Самара, 2009. 131 с. EDN: COXZEM
13. Лежнева А.А. Изгибные колебания балки переменной длины // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1970. № 1. С. 159-161.
14. Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Анализ влияния движения границ при исследовании резонансных свойств систем с демпфированием // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Физико-математические науки». 2009. № 2(19). DOI: 10.14498/vsgtu1079 EDN: LADKBT
15. Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Вычисление собственных частот поперечных колебаний вязкоупругого каната, движущегося в продольном направлении и имеющего изгибную жесткость // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. Самара: СамГТУ, 2008. 358 с.
16. Литвинов В.Л., Литвинова К.В. Применение метода Канторовича-Галеркина для анализа резонансных характеристик систем с затуханием // Теоретическая и математическая физика. 2025. Т. 224. № 1. С. 95-104. DOI: 10.4213/tmf10930 EDN: GRXBCL
17. Литвинов В.Л. Решение краевых задач с движущимися границами при помощи приближенного метода построения решений интегро-дифференциальных уравнений // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2020. Т. 26. № 2. С. 188-199. DOI: 10.21538/0134-4889-2020-26-2-188-199 EDN: LGJAHF
18. Литвинов В.Л., Литвинова К.В. Приближенный метод решения краевых задач с подвижными границами путем сведения к интегродифференциальным уравнениям // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2022. Т. 62. № 6. С. 977-986. DOI: 10.31857/S0044466922060126 EDN: NHEDUP
19. Литвинов В.Л., Шамолин М.В. Об одном асимптотическом методе решений однородных интегро-дифференциальных уравнений, описывающих колебания объектов с движущимися границами // Сибирский журнал индустриальной математики. 2025. Т. 28. № 2. С. 39-54. DOI: 10.33048/SIBJIM.2025.28.203 EDN: HLTSWB
20. Савин Г.Н. Об основных уравнениях шахтного подъемного каната // Прикладная механика. 1955. Т. 1. № 1. С. 15-24.
21. Литвинов В.Л., Анисимов В.Н. Математическое моделирование и исследование резонансных свойств механических объектов с изменяющейся границей: монография. Самара: СамГТУ, 2020. 118 с. EDN: WZLYFA
22. Литвинов В.Л., Литвинова К.В. Об одном обратном методе решения задач о колебаниях механических систем с движущимися границами // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2024. № 3. С. 53-59. DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-65-3-8 EDN: AZGKFY
23. Selivanova N.Yu., Shamolin M.V. Local solvability of a one-phase problem with free boundary // Journal of Mathematical Sciences. 2013. Vol. 189. No. 2. Pp. 274-283. DOI: 10.1007/s10958-013-1209-9 EDN: RFJYVD
24. Selivanova N.Yu., Shamolin M.V. Studying the interphase zone in a certain singular-limit problem. Journal

of Mathematical Sciences. 2013. Vol. 189, No. 2. Pp. 284–293. DOI: 10.1007/s10958-013-1210-5 EDN: RFJYWH

25. Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Квазигармоническая продольная волна, распространяющаяся в стержне Миндлина-Германа, погруженном в нелинейно-упругую среду // Теоретическая и математическая физика. 2022. Т. 211. № 2. С. 216–235. DOI: 10.4213/tmf10253 EDN: AVOJTF

26. Ерофеев В.И., Лисенкова Е.Е. Общие соотношения для волн, распространяющихся в одномерных упругих системах // Математические методы механики: материалы международной конференции. К 90-летию юбилею акад. А.Г. Куликовского. М.: МИАН, 2023. С. 26–27.

27. Семенов А.Л., Литвинов В.Л., Шамолин М.В. Исследование влияния движения границ на колебательные и резонансные свойства механических систем переменной длины // Computational Mathematics and Information Technologies. 2025. Т. 9. № 2. С. 34–43. DOI: 10.23947/2587-8999-2025-9-2-34-43 EDN: LTGFLA

References

1. Vesnitskiy A.I., Potapov A.I. [Transverse vibrations of ropes in mine hoists]. *Dinamika sistem. Gorkovskiy universitet* 1975;7:84–89. (in Russ.)

2. Kolosov L.V. [Longitudinal and transverse vibrations of the rope string of a hoisting unit]. *Minerals and Mining Engineering* 1981;3:83–86. (in Russ.)

3. Litvinov V.L. [Study of passage through resonance of a viscoelastic rope of variable length in lifting mechanisms]. In: Proceedings of Aerospace engineering, high technologies and innovations 2008: XI All-Russian science and technology conference. Perm; 2008. (in Russ.)

4. Zhu W.D., Chen Y. Theoretical and experimental investigation of elevator cable dynamics and control. *Trans. ASME. J. Vibr. and Acoust.* 2006;1:66–78.

5. Samarin Yu.P., Anisimov V.N. [Forced transverse vibrations of a flexible link during acceleration]. *BMSTU Journal of mechanical engineering* 1986;12:17–21. (in Russ.)

6. Ryue J., Thompson D. Decay rates of propagating waves in railway tracks at high frequencies. *J. Sound and Vibr.* 2009;4-5:955–976.

7. Lei Xiao-yan. Effect of abrupt changes in the rigidity of the railway bed base on its vibration under a moving load. *Journal of Vibration Engineering* 2006;2:195–199.

8. Mulukhov K.K. [Features of Dynamic Calculation of Belt–Wheel Conveyors]. *Proceedings of the North Caucasus State Technological University* 2000;7:266–269. (in Russ.)

9. Samarin Yu.P. On Wave Phenomena in Domains with Moving Boundaries. *Volzhskiy matematicheskiy sbornik. Kuibyshev* 1967;5:337–340. (in Russ.)

10. Vesnitskiy A.I. Waves in Systems with Moving Boundaries and Loads. Moscow: Fizmatlit; 2001. (in Russ.)

11. Anisimov V.N., Litvinov V.L., Korpen I.V. On a Method for Obtaining an Analytical Solution of the

Wave Equation Describing Oscillations of Systems with Moving Boundaries. *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences* 2012;3(28):145–151. DOI: 10.14498/vsgtu1079. (in Russ.)

12. Anisimov V.N., Litvinov V.L. Resonance Properties of Mechanical Objects with Moving Boundaries: a monograph. Samara State Technical University. Samara; 2009. (in Russ.)

13. Lezhneva A.A. Flexural Oscillations of a Variable–Length Beam. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Solid Body Mechanics* 1970;1:159–161. (in Russ.)

14. Anisimov V.N., Litvinov V.L. Analysis of the Influence of Boundary Movement in the Study of Resonance Properties of Damped Systems. *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences* 2009;2(19). DOI: 10.14498/vsgtu1079. (in Russ.)

15. Anisimov V.N., Litvinov V.L. Calculation of Natural Frequencies of Transverse Oscillations of a Viscoelastic Rope Moving in the Longitudinal Direction and Having Flexural Rigidity. In: Mathematical Modeling and Boundary Value Problems: Proceedings of the Fifth All-Russian Scientific Conference with International Participation. Part 1: Mathematical Models of Mechanics, Strength, and Reliability of Structural Elements. Samara: SamSTU; 2008. (in Russ.)

16. Litvinov V.L., Litvinova K.V. Application of the Kantorovich–Galerkin method for the analysis of resonant characteristics of systems with damping. *Teoreticheskaya i Matematicheskaya Fizika* 2025;224(1):95–104. DOI: 10.4213/tmf10930. (in Russ.)

17. Litvinov V.L. Solution of boundary value problems with moving boundaries using an approximate method for constructing solutions of integro–differential equations. *Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN* 2020;26(2):188–199. DOI: 10.21538/0134-4889-2020-26-2-188-199. (in Russ.)

18. Litvinov V.L., Litvinova K.V. An approximate method for solving boundary value problems with movable boundaries by reduction to integro–differential equations. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki* 2022;62(6):977–986. DOI: 10.31857/S0044466922060126. (in Russ.)

19. Litvinov V.L., Shamolin M.V. On an asymptotic method for solving homogeneous integro–differential equations describing oscillations of objects with moving boundaries. *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki* 2025;28(2):93–107. DOI: 10.33048/SIBJIM.2025.28.203. (in Russ.)

20. Savin G.N. On the basic equations of a mine hoisting rope. *Prikladnaya Mekhanika* 1955;1(1):15–24. (in Russ.)

21. Litvinov V.L., Anisimov V.N. Mathematical modeling and investigation of the resonant properties of mechanical objects with a changing boundary: a monograph. Samaral; SamGTUI; 2020. (in Russ.)

22. Litvinov V.L., Litvinova K.V. On one inverse method for solving problems of oscillations of mechanical systems with moving boundaries. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika* 2024;3:53–59. DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-65-3-8. (in Russ.)

23. Selivanova N. Yu., Shamolin M. V. Local solvability of a one-phase problem with free boundary. *Journal of Mathematical Sciences* 2013;189(2):274–283. DOI: 10.1007/s10958-013-1209-9 EDN: RFJYVD. (in Russ.)

24. Selivanova N. Yu., Shamolin M. V. Studying the interphase zone in a certain singular–limit problem. *Journal of Mathematical Sciences* 2013;189(2):284–293. DOI: 10.1007/s10958-013-1210-5. (in Russ.)

25. Erofeev V. I., Leont'eva A. V. Quasiharmonic longitudinal wave propagating in a Mindlin–Hermann rod embedded in a nonlinearly elastic medium. *Teoreticheskaya i Matematicheskaya Fizika* 2022;211(2):216–235. DOI: 10.4213/tmf10253. (in Russ.)

26. Erofeev V. I., Lisenkova E. E. General relations for waves propagating in one–dimensional elastic systems. In: *Mathematical Methods in Mechanics: materials of the international conference. To the 90th anniversary of academician A. G. Kulikovskiy*. Moscow, MIAN; 2023. Pp. 26–27. (in Russ.)

27. Semenov A. L., Litvinov V. L., Shamolin M. V. Investigation of the influence of boundary motion on the oscillatory and resonant properties of mechanical systems of variable length. *Computational Mathematics and Information Technologies* 2025;9(2):34–43. DOI: 10.23947/2587-8999-2025-9-2-34-43. (in Russ.)

Сведения об авторах

Владислав Львович Литвинов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Общетеоретические дисциплины (Высшей математики), Самарский государственный технический университет. Адрес: Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244. E-mail: vladlitvinov@rambler.ru

Владимирович Шамолин Максим – член–корреспондент РАН, доктор физико–математических наук, профессор, Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова. Адрес: Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: shamolin@rambler.ru

Кристина Владиславовна Литвинова – студент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. Адрес: Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: kristinalitvinova900@rambler.ru

About the authors

Vladislav L. Litvinov, Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of General Theoretical Disciplines (Higher Mathematics), Samara State Technical University. Address: 244 Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation. E-mail: vladlitvinov@rambler.ru

Maksim V. Shamolin, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Lomonosov Moscow State University. Address: 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. E-mail: shamolin@rambler.ru

Kristina V. Litvinova, Student, Lomonosov Moscow State University. Address: 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. E-mail: kristinalitvinova900@rambler.ru

Вклад авторов статью

В.Л. Литвинов – постановка задачи; формулировка идей исследования, целей и задач.

М.В. Шамолин – общее научное руководство; разработка методологии; визуализация; валидация.

К.В. Литвинова – перевод; изучение истории задачи; поиск литературы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Text mining журнала ДУ-46 с применением частотных методов обработки текста

Text mining of the DU-46 inspection log using frequency-based text processing methods

Канарский В.А.^{1*}
Kanarsky V.A.¹

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, Хабаровск

¹ Far Eastern State Transport University, Russian Federation, Khabarovsk

* vkanarsky@ro.ru



Канарский В.А.

Резюме. Для принятия обоснованных решений по устранению сбоев и неисправностей, возникших на объектах железнодорожной инфраструктуры, необходим оперативный доступ к информации о ранее выявленных нарушениях и динамике их устранения. Технические журналы, такие как ДУ-46, содержат ценные сведения о состоянии этих объектов (путей, стрелочных переводов, светофоров, фидеров, контактной сети и др.), однако в моменте они практически не используются при анализе причин вновь возникающих отказов. **Цель:** разработка алгоритма обработки записей журнала ДУ-46, позволяющего по запросу оператора получать сведения о предыдущих неисправностях или выполненных работах по конкретным объектам инфраструктуры. **Методы:** предобработка текста, лемматизация с использованием морфологического анализатора М. Коробова, частотный анализ текста, TF-IDF, L2-нормализация, вычисление косинусного расстояния и сортировка результатов. **Результат:** создан прототип приложения, позволяющий осуществлять поиск релевантных записей и отображать метрику сходства между запросом и найденными фрагментами, которые помимо всего прочего могут носить рекомендательный характер и использоваться для установления причин возникших сбоев. **Заключение:** использование оперативных журналов осмотра в сочетании с методами интеллектуального анализа текста (text mining) может стать основой для построения рекомендательных систем и систем поддержки принятия решений в техническом обслуживании объектов ж.д. инфраструктуры.

Abstract. For making well-founded decisions on the elimination of failures and malfunctions occurring in railway infrastructure facilities, prompt access to information on previously identified faults and the dynamics of their resolution is essential. Inspection logs such as DU-46 contain valuable data on the condition of these facilities (tracks, turnouts, signals, power supply, contact lines, etc.); however, they are hardly used in practice when analyzing the causes of newly emerging failures. **Aim.** To develop an algorithm for processing DU-46 log records that allows operators, upon request, to obtain information on previous malfunctions or maintenance activities on specific infrastructure objects. **Methods.** Text preprocessing, lemmatization using M. Korobov's morphological analyzer, frequency-based text analysis, TF-IDF, L2 normalization, cosine similarity calculation, and result sorting. **Result.** A prototype application has been developed that enables search for relevant records and displays a similarity metric between the query and the retrieved fragments, which, among other things, may serve as a recommendatory function for determining the causes of failures. **Conclusion.** The use of operational inspection logs in combination with text mining methods can form the basis for building recommendation systems and decision support systems in the maintenance of railway infrastructure facilities.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, журнал, ДУ-46, текст-майнинг, векторное представление, TF-IDF, косинусное расстояние, интеллектуальный поиск

Keywords: railway transport, inspection log, DU-46, text mining, vector representation, TF-IDF, cosine distance, intelligent search

Для цитирования: Канарский В.А. Text mining журнала ДУ-46 с применением частотных методов обработки текста // Надежность. 2026. №1 С. 12-20. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-12-20>

For citation: Kanarsky, V.A. Text mining of the DU-46 inspection log using frequency-based text processing methods. Dependability 2026;1: 12-20. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-12-20>

Поступила: 26.08.2025 / **После доработки:** 29.09.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 26.08.2025 / **Revised on:** 29.09.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

Для достижения целевого состояния системы обеспечения гарантированной безопасности перевозочного процесса ОАО «РЖД» выделяет 3 основных потенциальных области риска, к которым относятся:

- нормативная и техническая документация;
- состояние технических средств;
- технологическая дисциплина.

О надежности обеспечения перевозочного процесса, в первую очередь, судят на основании информации о состоянии технических средств, которые формируются на основании данных учета отказов технических средств и *контроля за их устранением*, а также *учета результатов осмотров* объектов инфраструктуры и подвижного состава. Технология сбора информации по отказам технических средств должна максимальным образом базироваться на данных объективных источников информации – показаниях систем мониторинга, результатах расшифровки скоростемерных лент, архивах микропроцессорных систем управления и систем обеспечения безопасности движения (ДЦ, ДК), данных вагонов-путеизмерителей и других мобильных средств измерений [1].

Современные производственные системы все шире внедряют подходы *предиктивной аналитики*, позволяющие выявлять неисправности, прогнозировать отказы и оценивать состояние оборудования. Так Надежкин В.А. рассматривает применение предиктивной аналитики к рельсовым цепям и показывает, что такой подход позволяет выявлять скрытые аномалии и формировать систему раннего предупреждения отказов, недоступную традиционным комплексам диагностики [2]. Минтус А.Н. описывает структуру подобной системы для устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), включающую модули сбора, обработки и прогнозирования данных [3].

Все эти решения положительным образом сказываются на проведении мероприятий по техническому обслуживанию (ТО). Несмотря на эти разработки, большинство подходов в этой области опирается на числовые данные от датчиков и полевых устройств для проведения анализа.

Бушуев С.В. подчеркивает, что современные системы диспетчерской и электрической централизации содержат подсистемы архивирования, в которых хранятся оперативная поездная обстановка и приказы операторов. Но такие данные используются только при разборе нештатных ситуаций – системного анализа архивной информации для поиска скрытых закономерностей и извлечения знаний, полезных для оптимизации процесса перевозок нет [4].

Андронов И.А., Сидоренко В.Г. описывают тенденции в автоматизации управленческого документооборота. Среди предложений отмечается применение *интеллектуальных механизмов категоризации и поиска*. Также авторы статьи отмечают, что большинство современных

систем документооборота ограничиваются базовыми функциями маршрутизации и хранения документов, в то время как потребности управленцев смещаются в сторону поддержки принятия решений [5].

Для обоснованного и своевременного упреждающего воздействия необходимо владеть информацией в реальном масштабе времени для прослеживания динамики изменения ситуации, причем не только о выявленных нарушениях, но и о динамике их устранения. Текстовые данные из оперативных журналов ТО содержат одни из самых важных сведений о функционировании систем и компонентов, но до сих пор рассматриваются как «черные дыры», то есть хранят ценные данные, неиспользуемые при принятии решений [6].

На железнодорожных станциях существует целый комплекс форм оперативного внутреннего учета, в котором фиксируются любые события, происходящие на путях, в посту электрической централизации, с устройствами сигнализации, централизации и блокировки (светофоры, стрелочные переводы, рельсовые цепи и т.п.), энергоснабжением, контактной сетью, записываются времена отправления и прибытия и т.п. Такие документы являются источником ценной информации, объясняющей снижение эффективности поездной работы, а также причины нарушения безопасности движения поездов.

Журнал ДУ-46

Одной из важнейших форм внутреннего учета на станциях является журнал осмотра путей, стрелочных переводов, устройств СЦБ, связи и контактной сети – журнал ДУ-46. Состояние этих объектов железнодорожной инфраструктуры, как правило, контролируется вручную в ходе плановых проверок и предупредительных мероприятий, сведения о результатах, внезапные отказы или неисправности фиксируются в указанном журнале. Записи в ДУ-46 ведутся под строгим контролем и безошибочно, причем сам журнал является важнейшим документом и в случае экстренных ситуаций служит доказательством причастности того или иного работника к происшествию, связанному с эксплуатацией железнодорожного транспорта в целом.

Таким образом, журнал осмотра ДУ-46 предназначен:

- для записей в него обо всех возникающих на станции и прилегающих к станции перегонах неисправностей устройств СЦБ, пути, контактной сети и других в хронологическом порядке;
- для записей о результатах периодических осмотров устройств на станции;
- для регистрации в нем в хронологическом порядке всех выполняемых на станции работ по техническому обслуживанию, устранению неисправностей, ремонту, строительству, реконструкции устройств СЦБ, пути и контактной сети;
- для записей в обязательном порядке о производстве путевых работ на станционных путях и перегонах вблизи станции (1-х участков удаления), требующих огражде-

ния сигналами остановки или уменьшения скорости, о снятии напряжения и подаче его в контактную сеть станции, об открытии и закрытии движения по путям и стрелочным переводам и др.;

– для записей о производстве работ, связанных с выключением устройств СЦБ из централизации [1].

Как следует из рис. 1, заполняемыми полями являются дата и время проводимого мероприятия, описание запланированной работы либо обнаруженной неисправности, сроки окончания/устранения, принятые меры, а также фамилии сотрудников и их подписи.

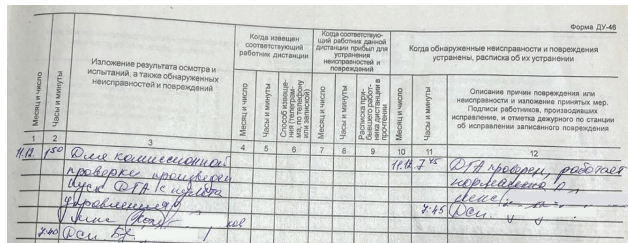


Рис. 1. Пример записи из журнале ДУ-46

В целом записи в журнале ДУ-46 имеют обобщенные формулировки, представленные в Приложении № 5 к Инструкции по обеспечению безопасности движения поездов при технической эксплуатации устройств и систем СЦБ [7]. Однако исходя из местных условий и эксплуатируемых устройств, эти формулировки дополняются конкретными номерами стрелок, наименованиями участков пути или светофоров.

В настоящей статье предлагается реализовать модуль рекомендаций на основе архивных журналов ДУ-46 с некоторой станции «А» (262 записи) и некоторой станции «Б» (124 записи). Наименование станций не раскрываются по коммерческим причинам.

Первичная обработка фрагментов ДУ-46

В ходе первичного визуального анализа журналов были выявлены следующие текстовые особенности:

- дополнительное указание времени в часах и минутах в столбце 3, вдобавок к указанному в столбце 2 времени (в др. записях как на рис. 1);
- избытие сокращений (ДСП, ДГА, ИРМ, ПОБ, ПСГО, РЦНС, КТСМ и т.п.);
- наличие узкоспециализированной терминологии («пульт-табло», «маневровый», «путеизмерительная», «курбель»);
- избытие числовых описаний разделов иных документов, номеров стрелок, поездов и т.п.;
- избытие пунктуации: кавычки, точки, символы «№» и «/»;
- наличие имен собственных.

Таким образом, анализируемый корпус текста нуждается в серьезной предварительной обработке (рис. 2):

- приведении слов к одному регистру;

- удалении специальных символов и знаков препинания;

- разделении (токенизации) корпуса текста на отдельные слова (токены);

- выявление среди токенов предлогов, союзов, имен собственных и их последующее удаление;

- приведение оставшихся слов к единой форме.

Слова «светофора» и «светофоров» обозначают один и тот же объект, но без приведения к одной форме они будут считаться различными словами. Существует два подхода к данной задаче – это стемминг и лемматизация.

Алгоритмы стемминга позволяют получить корень слова урезая суффиксы и окончания и является наиболее легковесным вариантом. Лемматизация – это более существенная процедура анализа, которая в большинстве случаев позволяет получить начальную форму слова (лемму): «перегорел», «перегорела» – начальная форма: «перегореть». Подход с использованием лемматизации вычислительно более затратный, однако при этом предпочтительнее из-за сложности морфологии русского языка [8], а также из-за обилия специализированных терминов журнала ДУ-46.

Для нахождения леммы был выбран морфологический анализатор `rumorphy3` Михаила Коробова [9]. На рис. 2 продемонстрирован процесс первичной обработки одной записи:

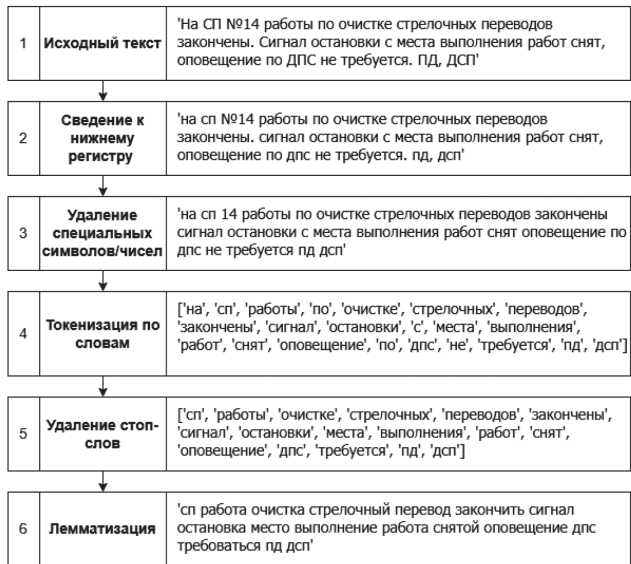
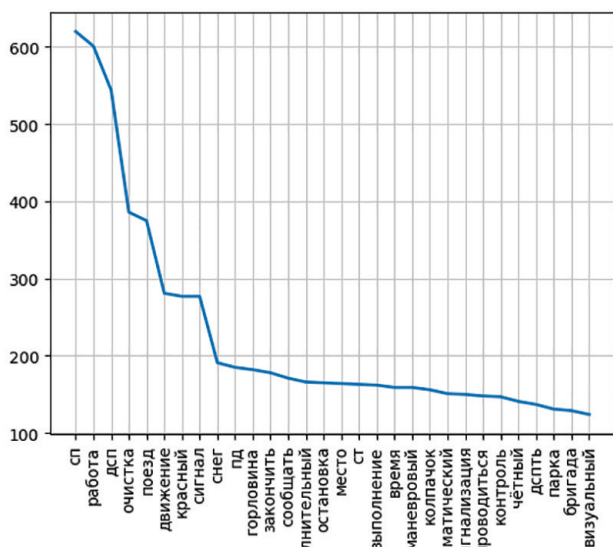


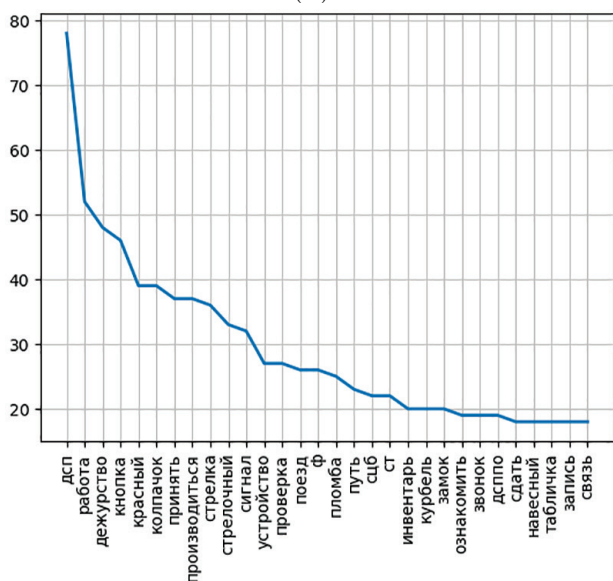
Рис. 2. Процесс обработки текста одной из записей в ДУ-46

После приведения слов к единой форме имеется возможность выполнить частотный анализ по журналам А и Б (рис. 3 и 4).

Согласно рис. 3, наиболее часто встречающимися словами являются «ДСП», «СП», «работа» и «очистка». Сокращение «ДСП» присутствует во всех записях журнала, поскольку каждая из них заверяется дежурным по станции, находившимся на смене в момент события. Общеупотребляемым также является слово



(А)



(Б)

Рис.3. Частотный анализ слов записей журнала «А» и «Б»

«работа», тогда как термины «снег» и «очистка» преимущественно связаны с зимним периодом ведения журнала. Таким образом, в рамках данного исследования указанные слова были отнесены к стоп-словам, поскольку они не отражают уникальных закономерностей в рассматриваемом корпусе записей. Вместе с тем при анализе данных, охватывающих более протяжённые временные интервалы (например, за год), целесообразно учитывать формулировки, связанные с сезонными видами работ.

Табл. 1. Морфологический анализ текста из журналов ДУ-46

Журнал	Всего слов	% уникальных слов	Распределение по частям речи, %		
			Существит.	Прилагател.	Глаголов
А	12860	4,4	65,74	18,31	15,95
Б	2034	20	66,8	16,62	16,56

Проводя более детальный анализ корпусов записей А и Б без учета стоп-слов были выявлены следующие показатели (табл. 1).

Анализ табл. 1 показывает, что распределение частей речи в обоих журналах имеет схожий характер. Однако в журнале А доля уникальных слов составляет лишь 4,4%, что свидетельствует о частом повторении одних и тех же формулировок и, как следствие, об однотипности выполняемых работ. При ограничении объема журнала А до 2000 слов доля уникальной лексики составила бы около 7%, что почти в три раза меньше, чем в журнале Б. Последний, напротив, демонстрирует более высокую вариативность словаря, что отражает разнообразие описываемых случаев и ситуаций на станции.

Тем не менее, для дальнейшего этапа исследования записи обоих журналов были агрегированы в один набор данных.

Унитарное кодирование и отбор признаков

Для обработки текста необходимо преобразовать его слова в численное представление. Одним из наиболее простых и распространенных подходов является использование унитарного (от англ. *one-hot encoding*) кодирования. После проведения лемматизации формируется словарь S, включающий все слова получившегося корпуса. В рамках унитарного кодирования каждое слово представляется вектором длиной, равной размеру словаря, где единичное значение занимает позицию, соответствующую данному слову (рис. 4).

$$\text{бригада} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$\text{видимость} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0].$$

Рис. 4. Пример унитарного представления слов

Таким образом, каждая запись журнала может быть представлена в виде «мешка слов» (англ. *bag of words*) – вектора, элементы которого соответствуют словам из словаря. Значения элементов вектора отражают количество вхождений соответствующего слова в данную запись. На примере, представленном на рис. 5, это можно проиллюстрировать следующим образом.

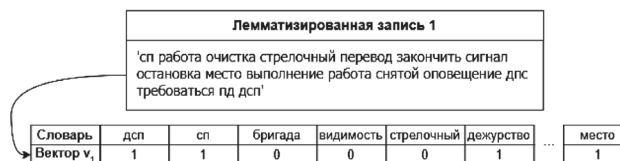


Рис. 5. Процесс преобразования записи 1 из ДУ-46 в вектор v_1

Недостатком такого подхода (рис. 5) является высокая размерность векторов v , равная размеру словаря S . В результате формируется значительное количество нулевых значений, так как каждая отдельная запись содержит гораздо меньше слов, чем весь словарь, и векторы получаются разреженными. Это особенно заметно для редких слов, встречающихся лишь однажды. Однако в некоторых задачах сохранение таких слов в векторах может быть полезным, поскольку они позволяют фиксировать уникальные совпадения между записями. Наиболее часто употребляемые слова (как отмечалось ранее), такие как «ДСП», «СП», «работа», «очистка», были внесены в список *стоп-слов*.

На этапе очистки 3 (рис. 2) при построении вектора числовые значения, которыми избылируют записи ДУ-46, были проигнорированы. Хотя в целом такие данные в обобщенном (*агрегированном*) виде могут нести полезную информацию и тем самым способствовать более корректной оценке близости текстов. Поэтому перед проведением вычислительных экспериментов в векторные представления был добавлен еще один признак – количество числовых значений, упомянутых в записи (номера стрелок, светофоров, фидеров, время, количество курбелей и т.п.) (переменная n_number) (рис. 6).

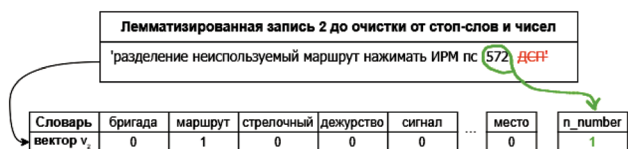


Рис. 6. Иллюстрация уточнения вектора признаком подсчета чисел

Векторизация записей ДУ-46 методом TF-IDF

Как уже отмечалось записи ДУ-46 основываются на обобщенных формулировках [6] и отличаются друг от друга некоторыми ключевыми словами. Для такого формата текста не очень подходит простой подсчет слов методом мешка слов. Для ключевых слов можно установить их важность с помощью *частоты термина и обратной частоты документа* (от англ. Term Frequency-Inverse Document Frequency, TF-IDF) [10].

Частота использования термина t в документе d определяется простым соотношением:

$$TF(t, d) = \frac{n_{t \in d}}{N_d}, \quad (1)$$

где $n_{t \in d}$ – количество термина t в документе d ;
 N_d – количество всех слов в документе d .

Обратная частота документа позволяет оценить вес (важность) термина t исходя из всего набора документов D :

$$IDF(t, D) = \log \frac{N_{t \in D}}{count(d_i \in D \text{ если } t \in d_i)}, \quad (2)$$

где $N_{t \in D}$ – количество документов, в которых встречается термин t ;

$count(\dots)$ – функция, которая возвращает количество документов d , в которых есть термин t .

Таким образом, уникальность термина t в документе с поправкой на его «встречаемость» во всем наборе записей D можно выразить следующим образом:

$$TF - IDF = TF \times IDF.^1 \quad (3)$$

Оценим важность термина «стрелочный» в документе (рис. 6) без стоп-слов:

$$TF(\langle \text{стрелочный} \rangle, \text{рис. 1}) = \frac{1}{13};$$

$$IDF(\langle \text{стрелочный} \rangle, \text{ДУ-46}) = \log \frac{400}{46} \approx 2,16;$$

$$TF - IDF(\langle \text{стрелочный} \rangle, \text{рис. 1}) = \frac{1}{13} \cdot 1,85 \approx 0,166.$$

Следуя такому алгоритму, термин «сигнал» из этой же записи, встречающийся 255 раз во всем имеющимся фрагменте ДУ-46 будет иметь вес 0,034. Получается в тексте рис. 5 слово «стрелочный» в 5 раз важнее слова «сигнал».

Таким образом, выполнив TF-IDF (по реализации, приведенной в [11]) для всех слов каждой из записей ДУ-46, получим более релевантные векторные представления (рис. 7). В разделе 3 мы также условились обогатить эти векторы дополнительным признаком n_number . В процессе подсчета числовых значений выяснилось, что максимальное количество чисел, встречающихся в одной заметке журнала, составляет 13, а минимальное – 0.

В завершение процедуры можно выполнить нормализацию всех строк таблицы записей, что позволит привести каждый вектор к единичной длине. Это достигается делением ненормализованного вектора записи на его евклидову норму (4):

$$v_{norm} = \frac{v}{\|v\|_2} = \frac{v}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2 + v_{n_number}^2}} = \frac{v}{\sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2}}, \quad (4)$$

где v – вектор одной записи ДУ-46;

$\| \cdot \|_2$ – обозначение евклидовой нормы (L2) вектора;

n – максимальное кол-во слов, содержащихся в слове; $v_1, v_2 \dots v_n$ – компоненты вектора, относящиеся к словам из словаря, рассчитанные по методу TF-IDF;

v_{n_number} – подсчитанное количество неизвестных слов и чисел в записи.

¹ Стоит уточнить, что окончательная реализация TF-IDF в вычислительном пакете [11] отличается от каноничной формулы (2) добавлением слагаемых «+1». Это делается для обеспечения численной стабильности предотвращает деление на 0 для терминов, которые не встретились ни в одном документе. Подробнее [11]

Лемматизированная запись 1 с подсчетом числовых значений

'ст-14 работа-очистка стрелочный перевод закончить сигнал остановка место выполнение работа снятой оповещение дис требовать под деп'

запись 1	бригада	маршрут	стрелочный	перевод	дежурство	сигнал	...	место	n_number
запись 2	0	0	0.31	0.19	0	0		0.26	0.082
...									
запись n	0	0	0	0	0.12	0.024		0	0

Рис. 7. Таблица нормализованных векторизованных записей ДУ-46

Таким образом, мы обеспечиваем одинаковую длину векторов v данных (строк) при сохранении их направления. Данное решение имеет особую ценность для текстов, потому что нас интересует больше схожесть записей по содержанию, а не по их по длине¹.

Алгоритм поиска релевантных записей

Получив векторное представление записей ДУ-46, можно организовать поиск интересующих событий, происшествий или выполненных работ по следующему алгоритму (рис. 8):

Производя поиск релевантных фрагментов по ДУ-46 запрос q , подаваемый пользователем, должен пройти те же этапы обработки, что и исходный набор данных – сначала выполнить очистку текста с использованием уже сформированного списка стоп-слов, затем преобразовать запрос в векторное представление на основе существующего словаря и нормализовать его по формуле (4).

¹ Подробнее в техническом блоге https://blog.milvus.io/ai-quick-reference/how-does-vector-normalization-affect-embeddings?utm_source=chatgpt.com

Для выявления фрагментов записей, наиболее близких по содержанию к запросу q , рассчитывается косинусное расстояние между вектором запроса q и векторами записей v_i из предварительной сохраненной матрицы (рис. 7):

$$\text{cosine distance} = 1 - \frac{q \cdot v_i}{\|q\| \cdot \|v_i\|} \tag{5}$$

С учетом заблаговременно проведенной нормализации выражение (5) можно упростить до:

$$\text{cosine distance} = 1 - q \cdot v_i \tag{6}$$

После получения списка косинусных расстояний, рассчитанных от векторного представления запроса q до каждого векторного представления предыдущей записи v_i ДУ-46, выполняется сортировка данного списка по возрастанию. Таким образом можно выбрать первые наименьшие косинусные расстояния, полученные от тех записей, которые наиболее релевантны запросу (рис. 8).

Заинтересованным читателям статьи подобный алгоритм может показаться излишним усложнением, ведь в любых текстовых редакторах уже имеются встроенные функции поиска по словам. Действительно, в строку поиска достаточно ввести основу ключевого слова, например «освещ», чтобы найти связанные заметки. Однако в реальности при работе с журналом ДУ-46 количество записей только за один год на одной станции может достигать нескольких сотен, и даже тысяч. В таких условиях оператору приходится просматривать большое число фрагментов, содержащих нужную основу, но не

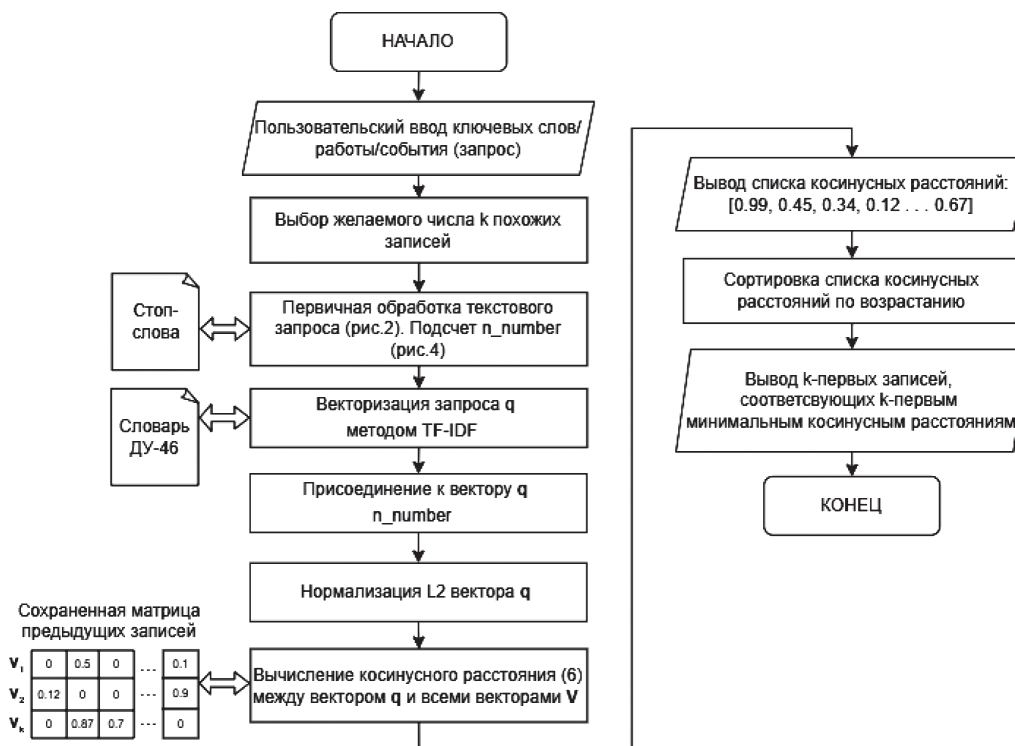


Рис. 8. Алгоритм поиска релевантных записей по запросу

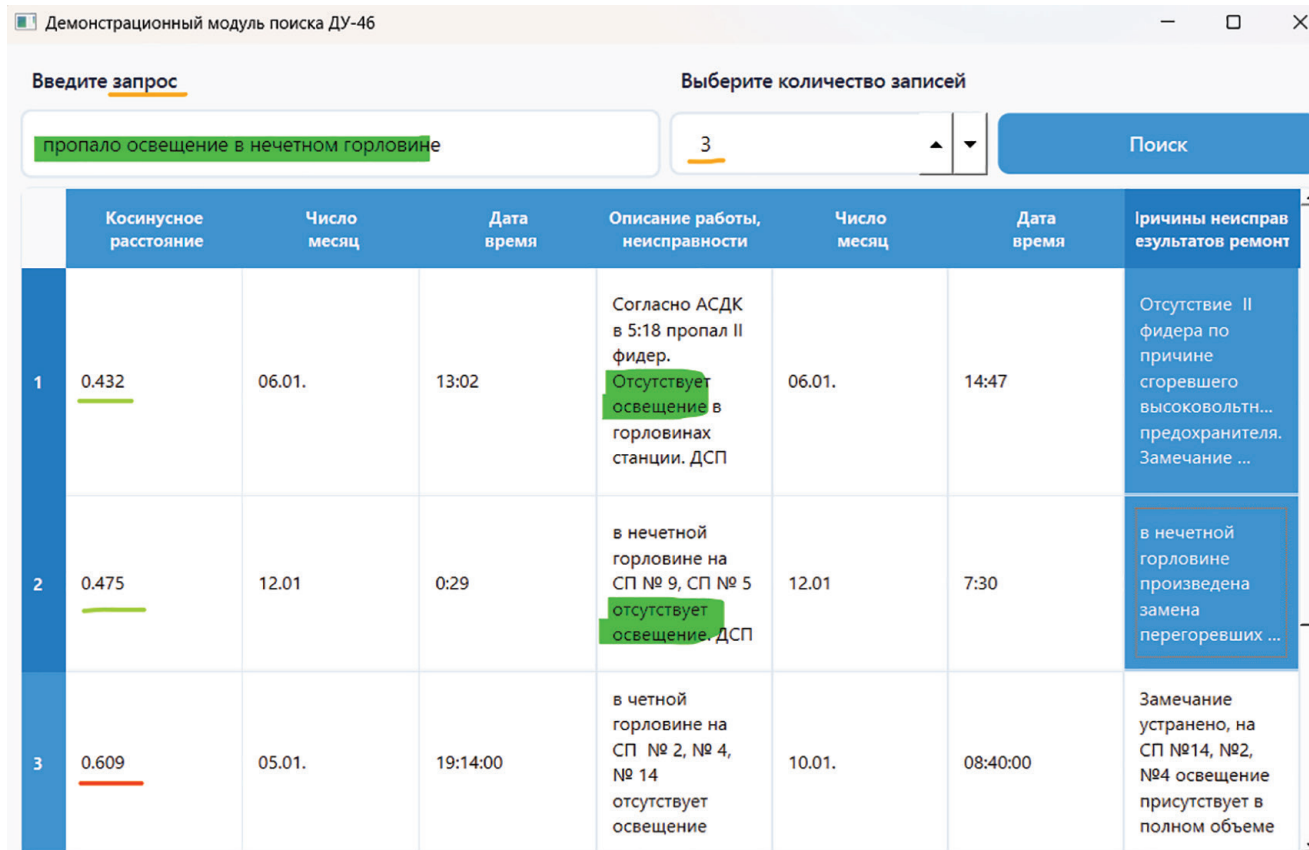


Рис. 9. Демонстрационное приложение на основе ДУ-46 и алгоритма рис. 8

всегда относящихся к искомой ситуации. Это делает простой поиск малоэффективным.

Предложенный алгоритм поиска релевантных записей (рис. 8) опирается не только на наличие отдельных слов, но и на совпадение набора слов из запроса с текстами в журнале. Это позволяет отбирать записи, которые содержат все ключевые термины запроса и, таким образом, являются более близкими по содержанию. Его преимущество особенно заметно при работе с большими объемами данных (несколько тыс. заметок), когда формируется еще более представительный словарь с учетом сложных терминов, технического жаргона и отраслевых сокращений. Важным является то, что алгоритм опирается именно на историю поломок конкретной станции, что делает рекомендации максимально прикладными: оператор (электромеханик) получает ответы, основанные не на абстрактных примерах, а на уже происшедших событиях в данной инфраструктуре.

Даже в рамках данного исследования, основанного на 400 записях, алгоритм показал эффективность. На рис. 9 приведен пример: в левой колонке выводится косинусное расстояние (чем меньше число, тем ближе найденный фрагмент), в центральной части отображаются описания происшествий, а в правой – соответствующие решения.

Таким образом, оператор (электромеханик) получает не просто совпадения по словам, а практическую рекомендацию, извлеченную из реального опыта устранения неисправностей на его станции.

Заключение

Учитывая современные тенденции цифровой трансформации транспортной отрасли, внедрение интеллектуальных алгоритмов обработки документации (text mining) на станциях может повысить готовность технического персонала к устранению неисправностей и восстановлению работоспособности объектов железнодорожной инфраструктуры. Даже простейшие алгоритмы, основанные на обработке записей о предыдущих сбоях, позволяют формировать полезные подсказки для специалистов. Создание же полноценной системы поддержки принятия решений требует применения более сложных агентных ИИ-систем, которые, однако, нуждаются в значительных вычислительных ресурсах и подвержены трудностям при интерпретации нестандартных ситуаций, включая риск генерации некорректных ответов.

Вместе с тем предложенный подход имеет ряд ограничений. Наибольшую сложность представляет работа с ошибками и опечатками в текстах: такие слова попадают в словарь в искаженном виде и могут не находиться при поиске по запросу, что снижает качество вычислений сходства. В дальнейшем исследования будут направлены на расширение корпуса данных за счет большего количества записей из журналов ДУ-46, а также на применении улучшенной модели векторизации текста FastText. Данная технология особенно интересна, так как благодаря использованию n-грамм позволяет учитывать близость

слов даже при их неправильном написании, при этом всё ещё оставаясь вычислительно легкой в сравнении с современными большими языковыми моделями.

Особую ценность для будущих исследований представляет подключение других форм документации, например журнала учета выполненных работ на объектах СЦБ и связи (ШУ-2), что позволит формировать более полное представление о техническом состоянии инфраструктуры и создать более «сильную» рекомендательную систему.

Следует отметить, что представленная тема исследования отвечает положениям о цифровой трансформации транспортной отрасли до 2030 г. [12] в части развития цифрового электронного документооборота. Однако развитие данного направления именно в железнодорожной отрасли во многом сдерживается традиционной практикой ведения оперативных журналов в бумажном виде на многих участках железных дорог. При этом уже существуют примеры применения электронных форм, в частности, использование журнала ДУ-46 в составе системы ЕКАСУИ (Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой) [13].

Список литературы

1. Информационные технологии на железнодорожном транспорте : учебное пособие : в 3 частях / Л.И. Папиrowsкая, Д.Н. Франтасов, Е.А. Часовских, М.Н. Липатова. Самара: СамГУПС, 2020. Часть 2: Информационные технологии в системе обеспечения движения поездов. 2020. 156 с.

2. Надежкин В.А. О возможности применения технологий искусственного интеллекта для определения и прогнозирования технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / В.А. Надежкин, С.А. Надежкина, А.Р. Мусин // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22. № 2. С. 484-491. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-484-491 EDN: XONKFC

3. Минтус А.Н. Разработка системы предиктивной аналитики для технического обслуживания устройств сигнализации, централизации и блокировки / А.Н. Минтус, С.И. Кучеренко, И.Г. Герасина // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2025. № 1(76). С. 59-64. EDN: TBRCBY

4. Анализ загрузки путевого развития станции (по данным архивов систем централизаций стрелок и сигналов) / С.В. Бушуев, Б.В. Рожкин, А.А. Блюдов, Н.С. Голочалов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2(50). С. 30-44. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-2-30-44 EDN: ХАККGM

5. Андронов И.А. Анализ современных подходов к построению систем электронного документооборота / И.А. Андронов, В.Г. Сидоренко // Интеллектуальные транспортные системы : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. Москва: Российский университет транспорта

(МИИТ), 2025. С. 42-48. DOI: 10.30932/9785002587582-2025-42-48 EDN: EWUCGV

6. Sundaram S., Zeid A. Technical language processing for Prognostics and Health Management: applying text similarity and topic modeling to maintenance work orders // Journal of Intelligent Manufacturing. 2024. Vol. 36. Pp. 1637–1657. DOI: 10.1007/s10845-024-02323-4

7. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ : инструкция ОАО «РЖД» № ЦШ-530 : утв. ОАО «РЖД» 20.09.2011 г. № 2055р. (ред. от 18.09.2020). URL: <https://itt-54.ru/wp-content/uploads/2023/12/Инструкция-ОАО-РЖД-Инструкция-по-обеспечению-БД-Н-ЦШ-530-11от-20.09.-2011-г.-№-2055р.pdf> (дата обращения: 22.08.2025).

8. Русаков А.М. Тестирование программных библиотек лемматизации текстов на Python / А.М. Русаков, П.А. Полянская // Наукосфера. 2023. № 11-1. С. 210-218. DOI: 10.5281/zenodo.10136822 EDN: EJFGZF

9. Коробов М. и др. Морфологический анализатор и генератор для русского и украинского языков // Материалы Международной конференции «Анализ изображений, социальных сетей и текстов» (International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts) / Communications in Computer and Information Science. 2015. С. 320–332. DOI: 10.1007/978-3-319-26123-2_31

10. Salton G., Wong A., Yang C.S. A vector space model for automatic indexing // Communications of the ACM. 1975. Vol. 18. No. 11. Pp. 613–620. DOI: 10.1145/361219.361220

11. TfidfTransformer [Электронный ресурс] // scikit-learn developers. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.TfidfTransformer.html. (дата обращения: 23.08.2025).

12. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли РФ до 2030 г.: распоряжение Правительства РФ от 03.11.2023 г. № 3097р // Министерство транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/12953> (дата обращения: 26.08.2025).

13. Зудина А. Еще одна безбумажная технология. // Гудок : газета «Волжская магистраль». 17.03.2023. № 9. URL: https://gudok.ru/zdr/168/?page_print_=Y&ID=1629697 (дата обращения 24.08.2025).

References

1. Papirovskaia L.I., Frantsov D.N., Chasovskikh E.A., Lipatova M.N. [Information technologies in railway transport: a textbook: in 3 parts. Part 2: Information technology in the train traffic management system]. Samara: SamGUPS; 2020. (in Russ.)

2. Nadezhkin V.A., Nadezhkina S.A., Musin A.R. Artificial Intelligence Technologies for Evaluation and Prediction of the Technical Condition of Railway Automation and Telemechanic Devices. Proceedings of Petersburg State Transport University, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 484–491. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-484-491. (in Russ.)

3. Mintus A.N., Kucherenko S.I., Gerasina I.G. Development of a predictive analytics system for the technical maintenance of signaling, centralization, and blocking devices. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* 2025;1(76):59-64. EDN: TBRCBY. (in Russ.)

4. Bushuev S.V., Rozhkin B.V., Bludov A.A., Golochalov N.S. Analysis of the station's track development load (according to the archives of railway switches and signal centralized systems). *Herald of the Ural State University of Railway Transport* 2021;2(50):30-44. (in Russ.)

5. Andronov I.A., Sidorenko V.G. Analysis of modern approaches to building electronic document management systems. In: *Intelligent Transportation Systems: Proceedings of the IV International Research and Practice Conference*. Moscow; May 22, 2025. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2025. Pp. 42-48. (in Russ.) DOI: 10.30932/9785002587582-2025-42-48 EDN: EWUCGV

6. Sundaram S., Zeid A. Technical language processing for Prognostics and Health Management: applying text similarity and topic modeling to maintenance work orders. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2024;36:1637-1657. DOI: 10.1007/s10845-024-02323-4.

7. [Manual for ensuring train traffic safety in the course of track work operations: JSC RZD manual no. TSH-530: approved by Order of JSC RZD dated 20.09.2011 no. 2055r. (as amended on 18.09.2020)]. (accessed: 22.08.2025). Available at: <https://itt-54.ru/wp-content/uploads/2023/12/Инструкция-ОАО-РЖД-Инструкция-по-обеспечению-БД-Н-ЦШ-530-11от-20.09.-2011-г.-№-2055р.pdf>. (in Russ.)

8. Rusakov A.M., Polyanskaya P.A. Testing software libraries for lemmatization of texts in Python. *Naukosfera* 2023;11-1:210-218. DOI: 10.5281/zenodo.10136822 EDN: EJFGZF. (in Russ.)

9. Korobov M. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages. In: *International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts / Communications in Computer and Information Science* 2015;320-332. DOI: 10.1007/978-3-319-26123-2_31. (in Russ.)

10. Salton G., Wong A., Yang C.S. A vector space model for automatic indexing. *Communications of the ACM* 1975;18(11):613-620. DOI:10.1145/361219.361220.

11. TfidfTransformer. scikit-learn developers. (accessed: 23.08.2025). Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.TfidfTransformer.html.

12. [On the approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the transportation industry of the Russian Federation to 2030: Decree of the Government of the Russian Federation dated 03.11.2023 no. 3097r. Ministry of Transport of the Russian Federation]. (accessed: 08/26/2025). Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/12953>. (in Russ.)

13. Zudina A. [Another paperless technology]. *Gudok: Volzhskaya magistral* 2023;9. (accessed 08/24/2025). Available at: https://gudok.ru/zdr/168/?page_print_=Y&ID=1629697. (in Russ.)

Сведения об авторе

Вадим Андреевич Канарский – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Автоматизированные, телекоммуникационные и электротехнические системы» в Дальневосточном государственном университете путей сообщения, Far Eastern State Transport University; г. Хабаровск, Российская Федерация: e-mail: vkanarsky@ro.ru; SPIN-код 3411-0352

About the Author

Vadim A. Kanarsky, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Acting Head of the Department of «Automated, Telecommunication and Electrical Engineering Systems», Far Eastern State Transport University; Khabarovsk, Russian Federation, e-mail: vkanarsky@ro.ru. SPIN-code: 3411-0352

Вклад автора в статью

В.А. Канарским были исследованы внутренние процессы учета работ и происшествий на объектах железнодорожного транспорта, проанализированы некоторые тенденции, характерные в сфере интеллектуальных транспортных систем и документооборота. Автором была собрана база документов из архивов действующих станций, разработан алгоритм, использующий эти документы как источник ценных знаний о состоянии объектов инфраструктуры. Вся необходимая подготовка, проводимые вычислительные эксперименты и создание прототипа приложения выполнены автором самостоятельно.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Анализ социальной реакции на инциденты: сравнение Архангельска и Екатеринбурга

Analysis of Social Response to Incidents: A Comparative Study of Arkhangelsk and Yekaterinburg

Малютина Е.В.^{1*}
Malyutina E.V.^{1*}

¹ Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН

¹ Science and Engineering Center «Reliability and Safety of Large Systems and Machines», Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

* 2malyutina2@mail.ru



Малютина Е.В.

Резюме. Цель исследования заключается в разработке и апробации методики анализа данных из социальных сетей, которая позволит повысить надежность систем реагирования на чрезвычайные ситуации за счет оперативного выявления, оценки масштаба, локализации и прогнозирования кризисных событий с учетом региональных особенностей общественной активности. Для достижения этой цели была создана программа на Python, выполняющая автоматизированный сбор, предварительную обработку и комплексный анализ данных из социальной сети ВКонтакте. Программа была протестирована на данных двух городов – Архангельска и Екатеринбурга, чтобы продемонстрировать ее применимость для мониторинга ЧС в различных регионах. **Методы.** В ходе исследования применялись методы сбора данных из открытых групп ВКонтакте, их предварительной обработки и комплексного анализа, который включал текстовый анализ (определение тональности комментариев и построение облаков слов), математический анализ (расчет энтропии и производной энтропии для оценки динамики активности) и анализ внешних факторов (влияние метеорологических условий, праздничных дней и выходных). **Результаты.** Исследование выявило значительные региональные различия в уровне социальной активности по различным категориям чрезвычайных ситуаций. Уровень активности в Архангельске превышает уровень в Екатеринбурге минимум в два раза, несмотря на меньшее население города. Характер активности также существенно различается: в Екатеринбурге наблюдаются более резкие всплески активности, тогда как в Архангельске активность распределена более равномерно. Сезонность проявляется в увеличении активности в периоды технических работ или экстремальных погодных условий. В категории «Пожар» оба города демонстрируют высокую и устойчивую активность, однако в Екатеринбурге отмечаются более резкие всплески, особенно в конце марта и начале апреля, что может свидетельствовать о крупных инцидентах. В категории «Отключение воды» в Архангельске зафиксированы два значительных пика активности – в апреле и 31 июля–1 августа, что может указывать на массовые проблемы с водоснабжением. В Екатеринбурге активность в этой категории значительно ниже, но чаще, что может говорить о мелких перебоях или информационных сообщениях. **Выводы.** Социальные сети представляют собой ценный источник данных для анализа общественной реакции на чрезвычайные ситуации. Выявленные региональные особенности поведения пользователей подчеркивают необходимость создания адаптированных систем мониторинга и прогнозирования, учитывающих специфику каждого региона. Использование данных из социальных сетей позволяет повысить надежность и эффективность систем реагирования за счет быстрого определения масштаба, местоположения и последствий инцидентов, а также выявления сезонных и локальных угроз. Полученные данные подтверждают необходимость внедрения автоматических инструментов анализа, способных оперативно оценивать ситуацию. Социальные сети могут служить индикатором сезонных и локальных угроз, что позволяет заранее готовиться к потенциальным рискам. Выявленные различия в уровнях активности между регионами подчеркивают важность учета местных условий при разработке стратегий информирования и управления кризисными ситуациями. Активное использование социальных сетей в качестве платформы для гражданского

участия демонстрирует их потенциал для усиления взаимодействия между населением и органами управления в условиях кризиса.

Abstract. The **Aim** of this study is to develop and validate a methodology for analyzing social media data to enhance the reliability of emergency response systems by enabling rapid identification, assessment of scale, location, and forecasting of crisis events based on regional specifics of public activity. To achieve this goal, a Python-based program was developed to automate the collection, preprocessing, and comprehensive analysis of data from the VKontakte social network. The program was tested using data from two cities with different demographic characteristics and socio-economic conditions, i.e., Arkhangelsk and Yekaterinburg. **Methods.** The research employed methods of data collection from open VKontakte groups, followed by preprocessing and comprehensive analysis. The analysis included text analysis (sentiment analysis and word cloud generation), mathematical analysis (entropy and entropy derivative calculations to assess activity dynamics), and external factor analysis (the influence of meteorological conditions, holidays, and weekends). **Results.** The study revealed significant regional differences in social activity levels across various categories of emergency situations. Activity levels in Arkhangelsk were at least twice as high as those in Yekaterinburg, despite the smaller population of the city. The nature of activity also differed significantly: sharp spikes in activity were observed in Yekaterinburg, while activity in Arkhangelsk was more evenly distributed. Seasonality manifested in increased activity during periods of technical work or extreme weather conditions. In the "Fire" category, both cities demonstrated high and sustained activity; however, sharper spikes were noted in Yekaterinburg, particularly at the end of March and beginning of April, potentially indicating major incidents. In the "Water Outage" category, two significant peaks in activity were recorded in Arkhangelsk, in April and on July 31 and August 1, possibly pointing to widespread water supply issues. In Yekaterinburg, activity in this category was lower but more frequent, likely reflecting minor disruptions or informational updates. **Conclusion.** Social networks serve as a valuable source of data for analyzing public reactions to emergency situations. The identified regional characteristics of user behavior highlight the need to create adaptive monitoring and forecasting systems that account for the specific features of each region. Using data from social networks enhances the reliability and efficiency of response systems by enabling rapid determination of incident scale, location, and consequences, as well as identifying seasonal and local threats. The findings confirm the necessity of implementing automated analytical tools capable of promptly assessing situations. Social networks can act as indicators of seasonal and local threats, allowing for proactive risk preparation. The observed differences in activity levels between regions underscore the importance of considering local conditions when developing strategies for communication and crisis management. Active use of social networks as a platform for civic participation demonstrates their potential to strengthen interaction between the public and authorities during crises.

Ключевые слова: надежность систем реагирования, социальные сети, анализ данных, чрезвычайные ситуации, мониторинг.

Keywords: reliability of response systems, social networks, data analysis, emergency situations, monitoring.

Для цитирования: Малютина Е.В. Анализ социальной реакции на инциденты: сравнение Архангельска и Екатеринбурга // Надежность. 2026. №1 С. 21-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-21-27>

For citation: Malyutina, E.V. Analysis of Social Response to Incidents: A Comparative Study of Arkhangelsk and Yekaterinburg. Dependability 2026;1:21-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-21-27>

Поступила: 01.10.2025 / **После доработки:** 21.10.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 01.10.2025 / **Revised on:** 21.10.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

В работах [1-3] сформулирована концепция и подход к энтропийному анализу социальных последствий крупных аварий урбанистических инфраструктур и систем на основе сбора необходимой информации, публикуемой в социальных сетях, отражающей детали аварийных происшествий, настроения, реакции и требования общества в связи с возникновением чрезвычайных ситуаций.

При этом выбор социальных сетей в качестве основного источника данных обусловлен тем, что они стали неотъемлемой частью информационного пространства, формируя новые способы взаимодействия людей и обмена информацией. В условиях глобализации и цифровизации общества эти платформы превратились в ключевой источник данных о событиях, происходящих в реальном времени. Многие пользователи полагаются на свои ленты в социальных сетях для того, чтобы узнавать о популярных событиях [4-7], формировать общественное мнение [8-10] и обсуждать чрезвычайные ситуации (ЧС). Особенно актуальной становится роль социальных сетей в контексте растущей сложности угроз и увеличения числа кризисных ситуаций, требующих оперативного реагирования.

Системы анализа данных из социальных сетей, такие как TwitterNews+, позволяют отслеживать и крупные, и второстепенные события в режиме реального времени [11]. Однако сфера применения этих данных не ограничивается новостными системами. Информация из социальных сетей может быть использована для обеспечения общественной безопасности, управления чрезвычайными ситуациями и прогнозирования потенциальных угроз. Для реализации такого потенциала необходима разработка специализированных методик и инструментов, способных обрабатывать большие объемы данных и выявлять значимые паттерны [12].

Анализ данных из социальных сетей обычно строится на четырех основных измерениях: время, пространство, контент и сеть. Эти параметры соответствуют таким полям метаданных, как временная метка, географические координаты, текст публикации и информация о репостах. Подобный подход может быть адаптирован для различных платформ, таких как ВКонтакте, которая является одной из самых популярных социальных сетей в России.

По данным исследования GSMA Intelligence¹ за 2025 год, в России насчитывается 106 миллионов активных пользователей социальных сетей, что составляет 73,4% от общей численности населения. Благодаря 93,8 миллионам активных пользователей в месяц ВКонтакте представляет собой важный источник данных для исследований поведения пользователей, особенно в контексте анализа реакции на ЧС.

¹ DataReportal. Digital 2025: The Russian Federation – The essential guide to digital trends [Электронный ресурс]. URL: <https://datareportal.com/reports/digital-2025-russian-federation> (дата обращения: 18.09.2025).

Таким образом, анализ данных из социальных сетей представляет собой перспективное направление исследований, которое может быть использовано для повышения эффективности систем реагирования на ЧС. Настоящая статья представляет собой первую из серии публикаций, посвященных методологии анализа социальной реакции на чрезвычайные ситуации. В ней подробно описываются этапы разработки программы, ее функциональные возможности и результаты применения для анализа данных по восьми категориям ЧС в двух городах – Архангельске и Екатеринбурге. Население Архангельска составляет 294 914 чел. (2025)², а Екатеринбурга – 1 548 187 чел. (2025)³.

1. Метрики вовлеченности в социальной сети ВКонтакте

Анализ вовлеченности пользователей в социальных сетях является важным инструментом для изучения общественного мнения и оценки качества контента. Социальная сеть ВКонтакте предоставляет широкие возможности для взаимодействия пользователей с контентом, что позволяет использовать различные метрики для анализа уровней вовлеченности и выявления общественных настроений.

На рис. 1 представлена визуализация типичной публикации из сообщества во ВКонтакте, демонстрирующая ключевые метрики взаимодействия пользователей с контентом. Центральным элементом являются три иконки, обозначающие основные метрики: лайки, комментарии и репосты.

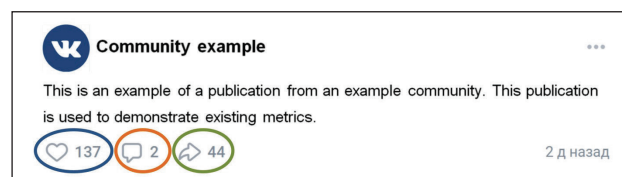


Рис. 1. Пример публикации в социальной сети ВКонтакте

Лайки представляют собой наиболее простой способ взаимодействия пользователей с контентом. Они служат универсальным показателем положительного восприятия публикации и отражают готовность пользователя поддержать или одобрить представленную информацию. На рис. 1 лайки отображены сердечком и окружены синим цветом. В контексте анализа общественного мнения количество лайков может коррелировать с общим уровнем позитивного отношения к обсуждаемой теме. Однако, несмотря на свою доступность и распространенность, лайки предоставляют ограниченные данные, так как не отражают глубину или разнообразие мнений.

^{2, 3} Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2025 года. Федеральная служба государственной статистики (25 апреля 2025) [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/>. Дата обращения: 26.09.2025.

Комментарии являются более сложной метрикой, которая отражает активное участие пользователей в обсуждении контента. В отличие от лайков, комментарии могут содержать аргументированные мнения, критику или поддержку, что делает их ценным источником информации для анализа общественного мнения. На рис. 1 комментарии отображены иконкой речевого пузыря и окружены оранжевым цветом. Большое количество комментариев свидетельствует о глубоком вовлечении аудитории и способности контента вызывать дискуссии. Благодаря своей текстовой природе комментарии могут быть проанализированы для выявления ключевых тем, настроений и общественных трендов.

Репосты играют важную роль в расширении охвата публикаций и распространении информации среди новых аудиторий. Этот вид взаимодействия свидетельствует о том, что пользователь считает контент достаточно ценным или значимым для своей сети контактов. На рис. 1 репосты отображены иконкой стрелки и окружены зеленым цветом. Репосты способствуют созданию цепной реакции, увеличивая потенциальное влияние сообщения на общественное мнение. Исследования показывают, что активно репостируемый контент имеет больший потенциал для формирования общественного восприятия определенных тем.

Среди рассмотренных метрик комментарии и репосты представляются наиболее ценными для анализа общественного мнения. Комментарии предоставляют качественные данные, которые могут быть проанализированы для выявления тем, настроений и мнений пользователей. Репосты, в свою очередь, являются важным индикатором влияния контента и его способности привлекать внимание более широкой аудитории.

Лайки, хотя и важны для оценки общей популярности контента, предоставляют менее глубокое понимание общественного мнения.

2. Методология анализа данных

На рис. 2 представлена блок-схема, отражающая полный цикл обработки данных, которая демонстрирует систематизированный подход к сбору, подготовке и анализу информации для выявления ключевых паттернов общественного поведения в условиях кризиса.

Авторская методика сбора и анализа данных включает несколько этапов, обеспечивающих полноту и точность результатов. На первом этапе осуществляется поиск сообществ ВКонтакте по ключевым словам (названия городов Архангельск и Екатеринбург) с использованием программного интерфейса приложений API. Далее проводится фильтрация публикаций по восьми категориям чрезвычайных ситуаций (*Пожар, Отключение воды, Авария на дороге, Конфликт, Экологический кризис, Терроризм, Наводнение и Пандемия*), при этом учитываются синонимы и вариации слов для повышения точности анализа.

На этапе предварительной обработки выполняется очистка и структурирование данных: удаляются дубликаты записей, публикации сортируются по дате и категории ЧС, формируется единый набор сообщений с последующей интеграцией метаданных (дата, уникальный идентификатор (ID), текст, количество лайков, комментариев, репостов и число сообщений за день). Этот этап критически важен для обеспечения чистоты данных и последующей корректности анализа, так как некачественные данные могут привести к ошибочным выводам.

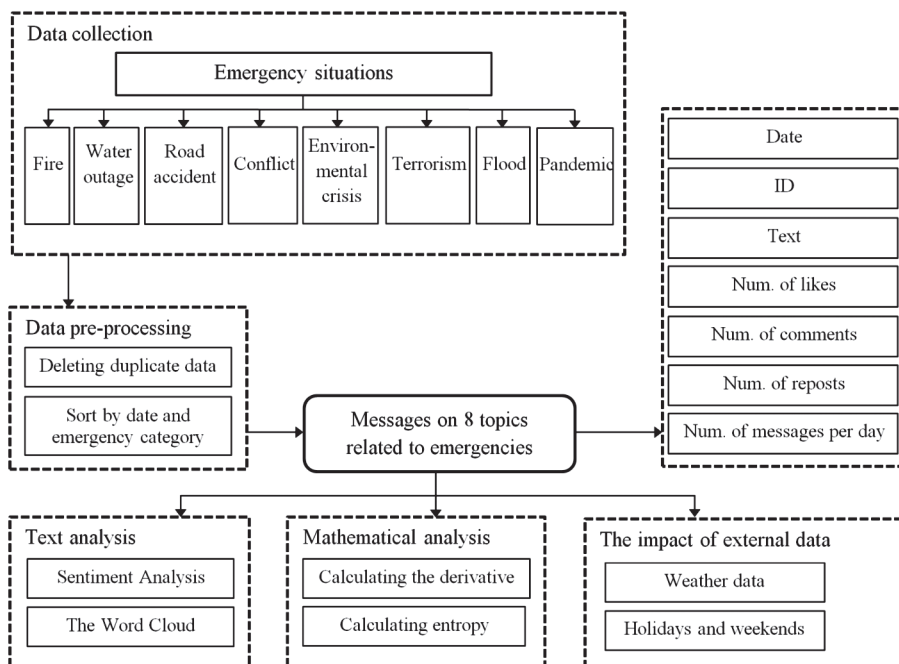


Рис. 2. Система оценки стихийных бедствий в социальных сетях и метод, использованный для анализа

Обработанные данные подвергаются трем параллельным видам анализа:

- Текстовый анализ включает *анализ тональности (Sentiment Analysis)* — классификацию комментариев на положительные, нейтральные, отрицательные. Также строятся *облака слов (The Word Cloud)*, позволяющие визуализировать наиболее частотные термины в обсуждениях. Этот анализ позволяет качественно понять настроения и ключевые темы, доминирующие в обществе в момент ЧС.

- Используемый математический аппарат основан на расчете *информационной энтропии* по формуле Шеннона, что позволяет количественно оценить степень хаотичности распределения комментариев во времени. *Производная энтропии* рассчитывается с использованием метода численного дифференцирования для выявления точек резкого изменения активности. Более детальное описание и результаты применения энтропийного анализа представлены в статьях [1, 2].

- Анализ внешних факторов исследует влияние метеорологических условий (температура, осадки, влажность), а также календарных признаков (праздничные дни, выходные) на уровень социальной активности, что позволяет отделить «естественные» колебания активности (например, снижение в выходные) от «кризисных» всплесков, тем самым повышая точность и надежность системы мониторинга.

Данная схема отражает модульную и комплексную методологию исследования, которая позволяет не только количественно оценить активность пользователей, но и качественно проанализировать их реакцию. Модификации и уточнения в методах анализа могут варьироваться в зависимости от данных и специфики каждого конкретного инцидента. Возможность интегрировать различные методы анализа делает данную методику универсальной и применимой в других контекстах. Исследование выступает как отправная точка для дальнейших работ, в которых будут более подробно разобраны полученные результаты в контексте полной методологии, изложенной в настоящей статье.

3. Результаты исследования

Рис. 3 представляет собой совокупность шести пар столбчатых диаграмм, каждая из которых отображает динамику числа комментариев по одной из шести категорий чрезвычайных ситуаций (Пожар, Авария на дороге, Конфликт, Отключение воды, Терроризм, Пандемия) в двух городах: Архангельске (зеленый цвет) и Екатеринбурге (синий цвет). Все графики охватывают временной период с 1 января по 1 августа 2025 года.

Все диаграммы были построены авторами с использованием Python на основе собранных и обработанных данных. Они демонстрируют количественные различия в динамике реакции пользователей двух городов на различные категории ЧС. Временная дискретизация данных составляет 1 день, что позволяет выявить как

краткосрочные всплески активности, так и долгосрочные тенденции.

Анализ данных выявил парадоксальную закономерность: при численности населения в 5,2 раза меньшей, чем в Екатеринбурге, Архангельск демонстрирует в 2-3 раза более высокую медианную активность по всем категориям ЧС. Эти различия подтверждают гипотезу о том, что поведение пользователей зависит не только от типа события, но и от местных условий. Например, в категории «Пожар» оба города демонстрируют высокую и устойчивую активность, однако характер этой активности существенно различается. В Екатеринбурге наблюдаются более резкие всплески активности, особенно в конце марта и начале апреля, что может указывать на крупные инциденты.

Напротив, в Архангельске активность распределена более равномерно, с множеством локальных пиков, вероятно связанных с мелкими региональными событиями.

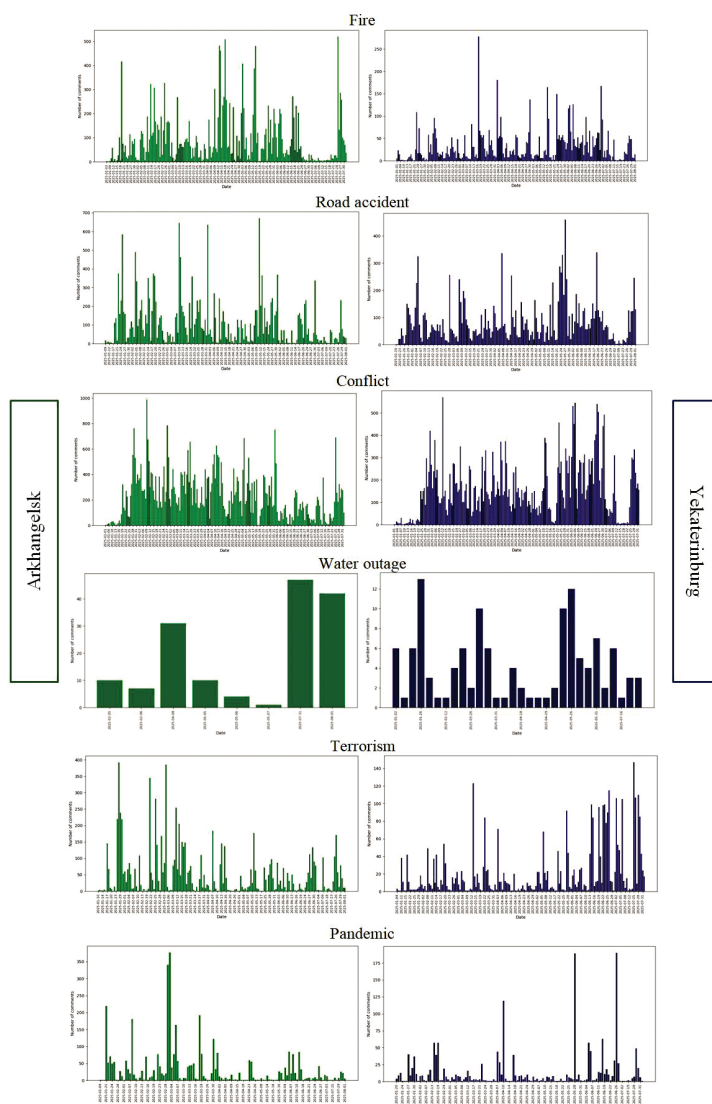


Рис. 3. Некоторые графики зависимости комментариев от времени в период с 01.01.25 по 01.08.25 г. Архангельска (зеленый) и г. Екатеринбурга (синий)

Особое внимание заслуживает категория «Отключение воды». В Архангельске зафиксированы два значительных пика активности – в апреле и 31 июля – 1 августа, что может свидетельствовать о массовых проблемах с водоснабжением. В Екатеринбурге активность в этой категории значительно ниже, но чаще, что может говорить о мелких перебоях или информационных сообщениях, сообщающих о временных неполадках или ремонтных работах. Аналогичная тенденция наблюдается в категории «Пандемия»: в Архангельске активность выше и имеет более продолжительные всплески активности, особенно в марте, тогда как в Екатеринбурге она остается на более низком уровне.

Данные также подтверждают сезонность некоторых событий. Например, увеличение активности в категории «Отключение воды» происходит в периоды технических работ или экстремальных погодных условий. Однако низкая активность в этой категории в обоих городах может свидетельствовать либо о меньшей чувствительности общества к этому типу угроз, либо о недостаточной доступности информации.

Особенно примечательно, что уровень социальной активности в Архангельске по всем категориям чрезвычайных ситуаций в среднем превышает уровень в Екатеринбурге минимум в два раза, несмотря на значительно меньшее население города. Этот феномен может объясняться несколькими факторами. Одной из возможных причин является более высокая плотность социальных связей и более тесное взаимодействие между жителями в менее крупных городах. В таких сообществах информация о локальных событиях распространяется быстрее и вызывает более активную реакцию за счет эффекта «малого города», где проблемы каждого воспринимаются как общие. Кроме того, жители небольших городов могут воспринимать социальные сети как более действенный инструмент для выражения своего мнения и привлечения внимания к проблемам из-за ограниченных возможностей других каналов коммуникации или менее развитой структуры гражданского общества по сравнению с мегаполисами. Также возможно, что в Архангельске существует более высокая гражданская активность и готовность населения участвовать в обсуждении местных проблем, что находит свое отражение в интенсивности использования социальных сетей для реагирования на ЧС.

Заключение

Исследование показывает, что социальные сети являются ценным источником данных для анализа общественной реакции на чрезвычайные ситуации и могут служить индикатором сезонных и локальных угроз, что позволяет заранее готовиться к потенциальным рискам. Особенно важным представляется тот факт, что социальная активность в ответ на чрезвычайные ситуации зависит не только от типа события, но и от таких факторов, как плотность населения, социаль-

ные связи и доступность информации. Выявленные различия в уровнях активности между регионами подчеркивают важность учета местных условий при разработке стратегий информирования и управления кризисными ситуациями.

Таким образом, использование данных из социальных сетей для анализа общественной реакции на ЧС представляет собой перспективное направление исследований, способное повысить надежность и эффективность систем реагирования. Это особенно актуально в условиях необходимости оперативного принятия решений на основе достоверных данных.

Список литературы

1. Timashev S., Malyutina E. Automated entropy analysis of the social consequences of urban man-made accidents and natural catastrophes // *Reliability: Theory & Applications*. 2024. Vol. 19. No. SI 6(81). Pp. 142-150.
2. Тимашев С.А., Малютин Е.В. Энтروпийный анализ социальной активности во время и после крупных аварий городской инфраструктуры. Екатеринбург : Уральский рабочий, 2023. 66 с.
3. Timashev S., Malyutina E. Entropy Analysis of Social Unrest After Large Urban Infrastructure Accidents // *ASCE INSPIRE*. 2023. № 1. Pp. 631–639. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784485163.074>
4. Diakopoulos N., De Choudhury M., Naaman M. Finding and assessing social media information sources in the context of journalism // *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*. 2012. Pp. 2451-2460. DOI: 10.1145/2207676.2208409
5. Kwak H. et al. What is Twitter, a social network or a news media? // *Proceedings of the 19th international conference on World wide web*. 2010. Pp. 591-600. DOI: 10.1145/1772690.1772751
6. Starbird K., Muzny G., Palen L. Learning from the crowd: Collaborative filtering techniques for identifying on-the-ground Twitterers during mass disruptions // *ISCRAM*. 2012.
7. Zubiaga A., Ji H., Knight K. Curating and contextualizing twitter stories to assist with social newsgathering // *Proceedings of the 2013 international conference on Intelligent user interfaces*. 2013. Pp. 213-224. DOI: 10.1145/2449396.2449424
8. Gao Y. et al. Brand data gathering from live social media streams // *Proceedings of international conference on multimedia retrieval*. 2014. Pp. 169-176. DOI: 10.1145/2578726.2578748
9. Olteanu A. et al. Social data: Biases, methodological pitfalls, and ethical boundaries // *Frontiers in big data*. 2019. Vol. 2. P. 13. DOI: 10.3389/fdata.2019.00013
10. Sung K.H., Lee M.J. Do online comments influence the public's attitudes toward an organization? Effects of online comments based on individuals' prior attitudes // *The Journal of psychology*. 2015. Vol. 149. No. 4. Pp. 325-338. DOI: 10.1080/00223980.2013.879847

11. Hasan M., Orgun M.A., Schwitter R. Real-time event detection from the Twitter data stream using the TwitterNews+ Framework // *Information Processing & Management*. 2019. Vol. 56. No. 3. Pp. 1146-1165. DOI: 10.1016/j.ipm.2018.03.001

12. Teodorescu H.N. Using analytics and social media for monitoring and mitigation of social disasters // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 107. Pp. 325-334. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.088

References

1. Timashev S., Malyutina E. Automated entropy analysis of the social consequences of urban man-made accidents and natural catastrophes. *Reliability: Theory & Applications* 2024;19:SI6(81):142-150.

2. Timashev S.A., Malyutina E.V. [Entropic analysis of social activity during and after major accidents of urban infrastructure]. Yekaterinburg: Uralsky Rabochy; 2023. (in Russ.)

3. Timashev S., Malyutina E. Entropy Analysis of Social Unrest After Large Urban Infrastructure Accidents. *ASCE INSPIRE* 2023;1:631-639. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784485163.074>.

4. Diakopoulos N., De Choudhury M., Naaman M. Finding and assessing social media information sources in the context of journalism. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*; 2012. Pp. 2451-2460. DOI: 10.1145/2207676.2208409.

5. Kwak H. et al. What is Twitter, a social network or a news media? In: *Proceedings of the 19th international conference on World wide web*; 2010. Pp. 591-600. DOI: 10.1145/1772690.1772751.

6. Starbird K., Muzny G., Palen L. Learning from the crowd: Collaborative filtering techniques for identifying on-the-ground Twitterers during mass disruptions. *ISCRAM*; 2012.

7. Zubiaga A., Ji H., Knight K. Curating and contextualizing twitter stories to assist with social newsgathering. In: *Proceedings of the 2013 international conference on Intelligent user interfaces*; 2013. Pp. 213-224. DOI: 10.1145/2449396.2449424.

8. Gao Y. et al. Brand data gathering from live social media streams. In: *Proceedings of international conference on multimedia retrieval*; 2014. Pp. 169-176. DOI: 10.1145/2578726.2578748.

9. Olteanu A. et al. Social data: Biases, methodological pitfalls, and ethical boundaries. *Frontiers in big data* 2019;2:13. DOI: 10.3389/fdata.2019.00013.

10. Sung K.H., Lee M.J. Do online comments influence the public's attitudes toward an organization? Effects of

online comments based on individuals' prior attitudes. *The Journal of psychology* 2015;149(4):325-338. DOI: 10.1080/00223980.2013.879847.

11. Hasan M., Orgun M.A., Schwitter R. Real-time event detection from the Twitter data stream using the TwitterNews+ Framework. *Information Processing & Management* 2019;56(3):1146-1165. DOI: 10.1016/j.ipm.2018.03.001.

12. Teodorescu H.N. Using analytics and social media for monitoring and mitigation of social disasters. *Procedia Engineering* 2015;107:325-334. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.088.

Сведения об авторе

Елизавета Владимировна Малютина, младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения Российской академии наук, аспирант УрО РАН. Адрес: ул. Студенческая, 54-а, г. Екатеринбург, Свердловская область, Российская Федерация, 620049. e-mail: 2malyutina2@mail.ru

About the author

Elizaveta V. Malyutina, Junior Researcher, Science and Engineering Center «Reliability and Safety of Large Systems and Machines», Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; postgraduate student, UB RAS. Address: 54-a Studencheskaya St., Yekaterinburg, Sverdlovsk Region, Russian Federation, 620049. e-mail: 2malyutina2@mail.ru

Вклад автора

Исследование проведено автором самостоятельно в полном объеме: выполнен анализ современной научной литературы по теме социальных сетей и их роли в контексте чрезвычайных ситуаций, разработана методология сбора и анализа данных из социальной сети ВКонтакте, включая создание блок-схемы обработки данных, осуществлен сбор эмпирических данных из открытых групп для городов Архангельска и Екатеринбурга, реализовано три параллельных вида анализа – текстовый, математический и анализ внешних факторов для восьми категорий чрезвычайных ситуаций, сформулированы выводы о региональных особенностях социальной активности.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



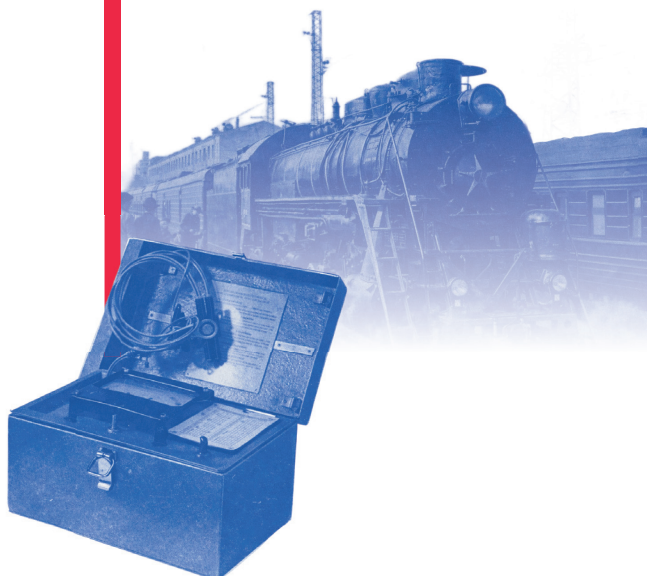
Телеграм-канал
АО «НИИАС»



Официальный сайт
АО «НИИАС»

1956

14 февраля 1956 года Министр путей сообщения СССР Б.П. Бещев подписал приказ о создании Конструкторского бюро Главного управления сигнализации и связи (КБ ЦШ).



1960

Разработаны и внедрены отечественные системы автоматической локомотивной сигнализации.



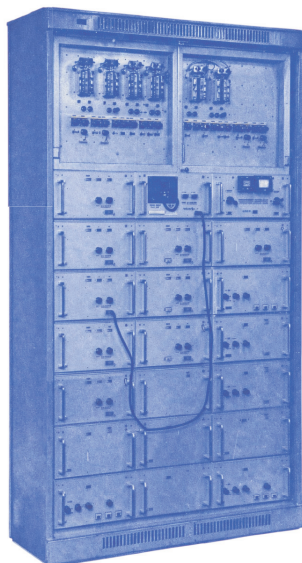
1990

Внедрение автоматизированных информационных систем АСОУП, ДИСПАРК, ДИСТПС, «Грузовой экспресс», новые системы локомотивной сигнализации для скоростного движения АЛС-ЕН.



1970

Создание устройств диспетчерской централизации, сигнализации и автоблокировки. Развитие направления автоматизации технологических процессов.

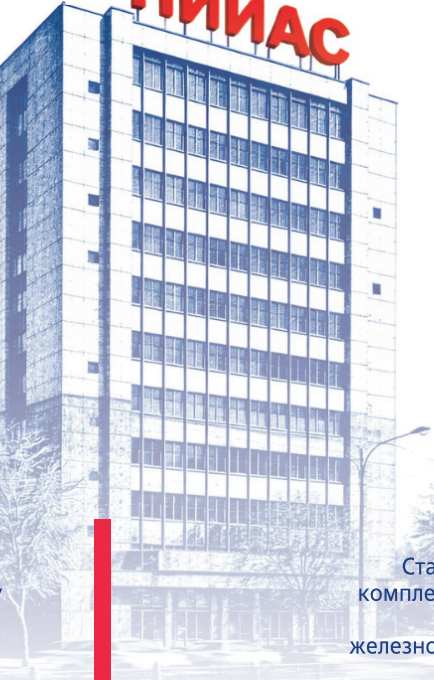


1980

Разрабатывается автоматизированная система роспуска грузовых вагонов на сортировочных горках КГМ РИИЖТ.



НИИАС

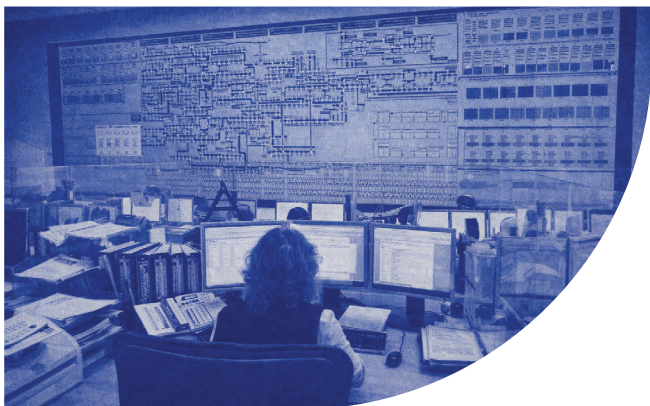


2010

Старт разработок в области комплексной интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ).

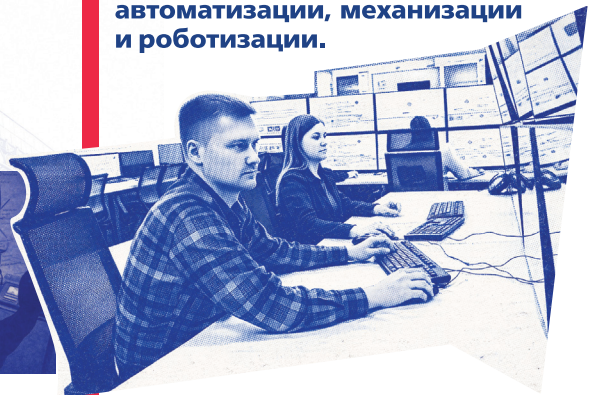
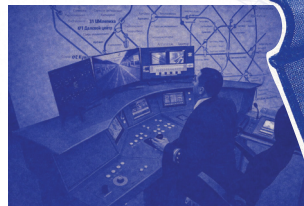
2000

Достижения в сфере создания бортовых устройств безопасности для тягового, моторвагонного и специального подвижного состава. Началось массовое внедрение систем КЛУБ, КЛУБ-У, КЛУБ-П.



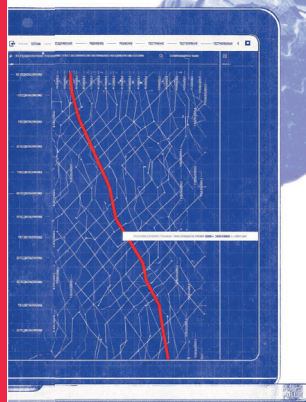
2026

Внедрение единой программно-аппаратной экосистемы, включающей новейшие средства автоматизации, механизации и роботизации.



2020

Внедрение цифровых решений в области железнодорожного транспорта. Развитие систем интервального регулирования движением поездов. Разработка беспилотного управления поездами и бортовых систем безопасности.



Комплексное обеспечение безопасности объектов транспортной инфраструктуры

Comprehensive security of transport infrastructure facilities

Воронин А.А.^{1*}
Voronin A.A.^{1*}

¹ Российский государственный социальный университет, Российская Федерация, Москва

¹ Russian State Social University, Russian Federation, Moscow

* stalkercrow@yandex.ru



Воронин А.А.

Резюме. В Российской Федерации функционирует обширная сеть транспортной инфраструктуры, включающая более 100 000 объектов различного назначения: мосты, тоннели, путепроводы, автомобильные и железнодорожные вокзалы. Каждый из этих объектов представляет стратегическую важность для обеспечения транспортной безопасности страны и требует комплексной защиты от потенциальных угроз различного характера. Полная физическая защита всех объектов транспортной инфраструктуры (далее по тексту – ОТИ) от всех возможных угроз является практически неосуществимой задачей, что обусловлено прежде всего экономической нецелесообразностью и колоссальными финансовыми затратами. В связи с этим первостепенной задачей становится определение приоритетных объектов, требующих усиленного внимания в плане обеспечения безопасности. Для эффективного управления безопасностью критически важных объектов предлагается разработка специализированной системы, которая позволит: отслеживать текущее состояние защищенности объектов; оперативно реагировать на изменение угроз безопасности; адаптировать меры защиты в соответствии с текущей обстановкой; планировать мероприятия по усилению безопасности на основе анализа новых рисков. Внедрение такой системы позволит создать гибкую и адаптивную систему защиты транспортной инфраструктуры, способную оперативно реагировать на появление новых угроз и обеспечивать необходимый уровень безопасности наиболее значимых объектов. **Цель.** Разработка комплексной многоуровневой системы обеспечения безопасности ОТИ, способной эффективно противостоять современным угрозам и оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям. **Методы.** В процессе исследования применялись: анализ действующей системы категорирования ОТИ с последующей разработкой иерархической системы оценки защищенности объектов, создание математического аппарата для расчета показателей устойчивости. **Результаты.** По итогам исследования были достигнуты следующие результаты: разработана многоуровневая иерархическая система оценки защищенности объектов, создан комплексный математический аппарат для расчета показателей устойчивости, предложено программное решение для управления безопасностью, определены ключевые показатели эффективности системы. Практическая значимость исследования заключается в создании системы, позволяющей: в режиме реального времени отслеживать состояние защищенности объектов; оперативно выявлять уязвимости и принимать меры по их устранению; формировать приоритетный список объектов для модернизации систем безопасности; оптимизировать распределение ресурсов на обеспечение безопасности; создавать единую систему мониторинга безопасности. Разработанная система обеспечивает: повышение уровня защищенности транспортной инфраструктуры; сокращение времени реагирования на угрозы; оптимизацию затрат на обеспечение безопасности; улучшение координации между различными службами безопасности; возможность оперативного планирования мероприятий; прозрачность управления безопасностью. **Заключение.** Внедрение предложенной системы позволит создать динамичную систему управления транспортной безопасностью, способную оперативно адаптироваться к новым угрозам и обеспечивать необходимый уровень защищенности критически важных ОТИ. Результаты исследования могут быть использованы при модернизации существующих систем безопасности и создании новых систем защиты ОТИ, а также как инструмент для принятия управленческих решений в условиях угроз природного и техногенного характера.

Abstract. The Russian Federation operates an extensive transport infrastructure network comprising over 100,000 facilities of various types: bridges, tunnels, overpasses, road and railway stations. Each of these facilities is of strategic importance for ensuring the country's transport security and requires comprehensive protection against potential threats of various

kinds. Providing complete physical protection for all transport infrastructure facilities (hereinafter referred to as TIF) against all possible threats is a practically unfeasible task, primarily due to economic inexpediency and colossal financial costs. Consequently, the primary task becomes identifying priority facilities requiring enhanced attention in terms of security. To effectively manage the security of critical facilities, the development of a specialized system is proposed. This system would enable: tracking the current security status of facilities; promptly responding to changes in security threats; adapting protective measures in accordance with the current situation; and planning security enhancement measures based on the analysis of new risks. Implementing such a system will create a flexible and adaptive transport infrastructure protection framework capable of promptly responding to emerging threats and ensuring the necessary level of security for the most significant facilities. **Purpose.** Development of a comprehensive, multi-level system for ensuring the security of TIF, capable of effectively countering modern threats and promptly adapting to changing conditions. **Methods.** The research involved analyzing the existing TIF categorization system, followed by the development of a hierarchical facility security assessment system and the creation of a mathematical framework for calculating resilience indicators. **Results.** The research yielded the following outcomes: a multi-level hierarchical system for assessing facility security was developed; a comprehensive mathematical framework for calculating resilience indicators was created; a software solution for security management was proposed; and key performance indicators for the system were defined. **Practical significance.** The study's practical significance lies in creating a system that enables: real-time monitoring of facility security status; prompt identification of vulnerabilities and implementation of mitigation measures; generating a priority list of facilities for security system modernization; optimizing resource allocation for security provision; and establishing a unified security monitoring system. The developed system ensures an increased level of transport infrastructure security; reduced response time to threats; optimized security costs; improved coordination among various security services; capability for operational planning of measures; and transparency in security management. **Conclusion.** Implementing the proposed system will create a dynamic transport security management framework capable of promptly adapting to new threats and ensuring the necessary level of protection for critical TIF. The research results can be used in modernizing existing security systems and creating new TIF protection systems, as well as serving as a tool for managerial decision-making in the face of natural and man-made threats.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, безопасность, иерархическая система, категорирование, оценка, угрозы.

Keywords: transport infrastructure, security, hierarchical system, categorization, assessment, threats.

Для цитирования: Воронин А. А. Комплексное обеспечение безопасности объектов транспортной инфраструктуры // Надежность. 2026. №1 С. 30-36. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-30-36>

For citation: Voronin, A.A. Comprehensive security of transport infrastructure facilities. *Dependability* 2026;1: 30-36. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-30-36>

Поступила: 05.06.2025 / **После доработки:** 02.07.2025 / **К печати:** 27.11.2025

Received on: 05.06.2025 / **Revised on:** 02.07.2025 / **For printing:** 27.11.2026

В настоящее время регулирование вопросов транспортной безопасности в России осуществляется в соответствии с постановлением Правительства РФ от 03.10.2020 г. № 1595. Согласно документу, все ОТИ проходят обязательную процедуру категорирования, которая определяет уровень их защищенности.

Процедура категорирования включает оценку нескольких ключевых параметров: количество потенциальных жертв при чрезвычайной ситуации, возможный материальный ущерб, ущерб окружающей среде, влияние на работу транспортной системы, территориальное расположение объекта и его социальную значимость.

На основе присвоенной категории разрабатывается комплексная система мер по обеспечению транспортной безопасности. Организационные меры включают установление специального режима охраны, контроль доступа, проверку персонала и посетителей, проведение инструктажей и учений, а также разработку планов действий при угрозах.

Технические средства защиты представлены системами видеонаблюдения, охранно-тревожной сигнализацией, системами контроля и управления доступом, металлодетекторами, рентгеновским оборудованием и системами оповещения.

Процедуры реагирования предусматривают четкие алгоритмы действий при обнаружении угрозы, планы эвакуации, взаимодействие с экстренными службами и порядок информирования ответственных лиц.

Анализ действующей системы показывает наличие существенных недостатков. Основные проблемы заклю-

чаются в формальном подходе к оценке защищенности объектов, отсутствии учета комплексного характера угроз, негибкости системы при изменении уровня угроз, сложности адаптации существующих мер защиты и недостаточной взаимосвязи между различными уровнями безопасности.

Для определения способности объекта функционировать без сбоев в определенных ситуациях (устойчивость функционирования объекта – это его способность выполнять функции и сохранять основные параметры в пределах норм при всех видах внутренних и внешних воздействий) предлагается комплексный подход к оценке его устойчивости [1-2].

Для решения этих проблем предлагается внедрить многоуровневую иерархическую систему оценки ОТИ. Новая система основана на последовательном анализе существующих мер защиты и включает несколько компонентов: базовый уровень (оценка физической защищенности объекта), операционный уровень (анализ эффективности применяемых мер безопасности), стратегический уровень (оценка влияния внешних факторов и потенциальных угроз), аналитический уровень (мониторинг и прогнозирование рисков) и управленческий уровень (принятие решений по корректировке мер защиты).

Внедрение новой системы позволит создать комплексную систему мониторинга безопасности, обеспечить гибкость реагирования на изменение угроз, оптимизировать распределение ресурсов на обеспечение безопасности, повысить эффективность принимаемых

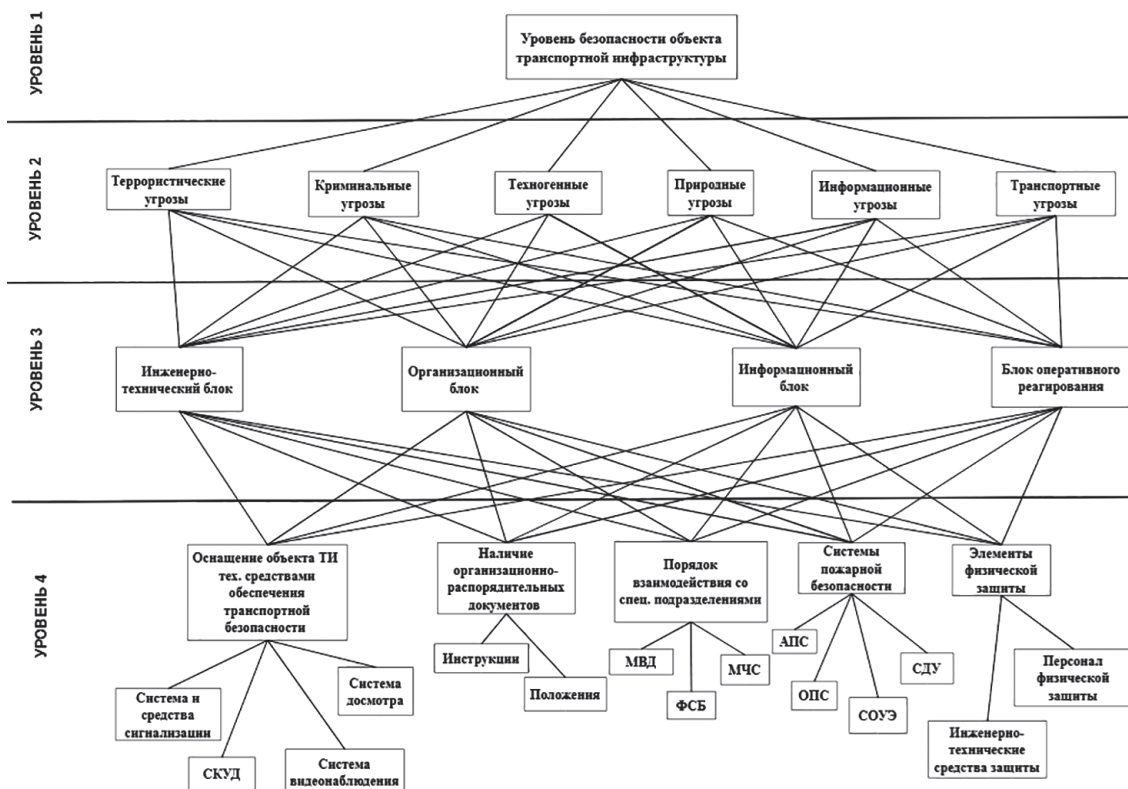


Рис. 1. Структура иерархической системы категорирования ОТИ

мер защиты и создать механизм оперативной корректировки системы безопасности.

Процесс внедрения новой системы предполагает несколько этапов: разработку методологической базы оценки, создание программного обеспечения для мониторинга, обучение персонала новым методикам оценки, пилотное внедрение системы на отдельных объектах, корректировку методики на основе полученных результатов и масштабирование системы на всю транспортную инфраструктуру.

Ожидаемые результаты реализации новой системы включают повышение эффективности мер защиты, сокращение времени реагирования на угрозы, оптимизацию затрат на обеспечение безопасности, создание единой системы мониторинга безопасности, повышение уровня защищенности транспортной инфраструктуры и улучшение координации между различными службами безопасности.

Таким образом, внедрение иерархической системы оценки позволит создать более надежную и гибкую систему обеспечения транспортной безопасности, способную эффективно противостоять современным угрозам и оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям.

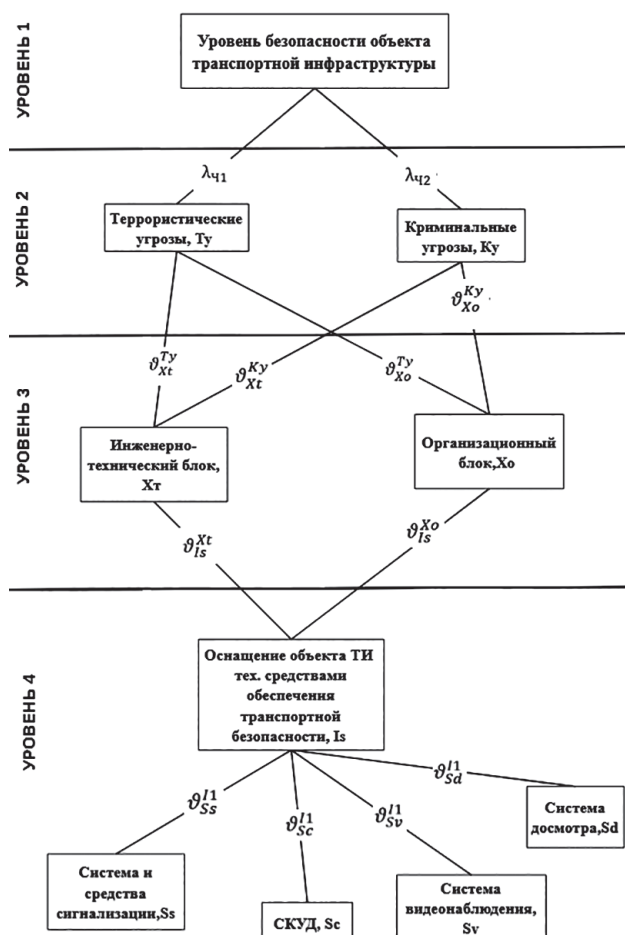


Рис. 2. Часть структуры иерархической системы категорирования ОТИ

Возможная структура иерархической системы категорирования ОТИ представлена на рис. 1.

В дальнейшем проводится оценка устойчивости элементов структуры (для примера (рис. 2) используется часть структуры иерархической системы категорирования ОТИ) с использованием нормированных показателей, а также осуществляется конволюция коэффициентов значимости и соответствующих показателей [3]. Это позволяет определить индексы устойчивости отдельных систем и общий индекс устойчивости [4]. Индексы устойчивости [5] отдельных систем представляют собой комплексные показатели устойчивости функционирования основных систем ОТИ, объединенных по функциям в блоки.

Расчет показателей устойчивости основных систем ОТИ, интегрированных по функциям в блоки:

$$I_s = \vartheta_{Ss}^{Is} \cdot S_{Ss}^{Is} + \vartheta_{Sc}^{Is} \cdot S_{Sc}^{Is} + \vartheta_{Sv}^{Is} \cdot S_{Sv}^{Is} + \vartheta_{Sd}^{Is} \cdot S_{Sd}^{Is} \quad (1)$$

Расчет показателей устойчивости основных систем ОТИ, относительно функциональных блоков:

$$X_t = \vartheta_{Xt}^{Xt} \cdot I_{Xt}^{Xt} \quad (2)$$

$$X_o = \vartheta_{Xo}^{Xo} \cdot I_{Xo}^{Xo}$$

Интегральный индекс устойчивости для конкретного вида угрозы:

$$T_y = \vartheta_{Xt}^{Ty} \cdot X_{Xt}^{Ty} + \vartheta_{Xo}^{Ty} \cdot X_{Xo}^{Ty} \quad (3)$$

$$K_y = \vartheta_{Xt}^{Ky} \cdot X_{Xt}^{Ky} + \vartheta_{Xo}^{Ky} \cdot X_{Xo}^{Ky}$$

Интегральный индекс устойчивости, показывающий общую устойчивость объекта (ОУО):

$$OYO = \lambda_{q1} \cdot T_y + \lambda_{q2} \cdot K_y \quad (4)$$

где ϑ^* – весовой коэффициент значимости системы по отношению к определенному блоку;

S^*, I^*, X^*, T^* – показатели устойчивости каждой системы блока.

В общем виде показатель устойчивости с учетом временного фактора будет иметь вид:

$$I_i(t) = \sum_{i=1}^n K_{ij}(t) P_{ij}(t) \quad (5)$$

где $K_{ij}(t)$ – весовой коэффициент в момент времени t ;

$P_{ij}(t)$ – показатель устойчивости в момент времени t .

Нормирование показателей происходит на каждом уровне иерархии:

- 1) все показатели приводятся к единому диапазону значений;
- 2) используется метод линейной нормализации;
- 3) значения переводятся в шкалу [0,1].

Весовые коэффициенты регулируются следующим образом:

Таблица. Классификация ОТИ

Класс	Значение индекса	Значение индекса	Соответствие стандартам	Рекомендации
K1	0,85-1,0	0,85-1,0	Полное соответствие	Профилактика, мониторинг
K2	0,7-0,84	0,7-0,84	Частичные отклонения	Оптимизация слабых параметров
K3	0,55-0,69	0,55-0,69	Требует модернизации	Модернизация критических блоков
K4	0,4-0,54	0,4-0,54	Несоответствие ключевым требованиям	Редизайн систем защиты

1) сумма всех коэффициентов на каждом уровне равна 1;

2) коэффициенты определяются экспертным методом;

3) производится корректировка при изменении условий.

Иерархическая система категорирования предполагает многоуровневую оценку объекта для определения его класса устойчивости (в отличие от категориальной системы, где присваивается фиксированная категория). Этот класс отражает способность объекта противостоять угрозам и соответствовать современным стандартам защиты. Пример классификации ОТИ представлен в табл.

Нормирование параметров разнородных систем контроля включает несколько ключевых аспектов: разработка единой шкалы оценки для всех систем, установление весовых коэффициентов важности каждого параметра, определение базовых минимально допустимых значений, создание комплексной методики оценки.

Процесс нормирования состоит из:

- 1) идентификации всех контролируемых систем;
- 2) классификации параметров по типам и важности;
- 3) установки допустимых диапазонов значений;
- 4) разработки методов измерения показателей;
- 5) объединения данных в общую систему.

Особенности нормирования:

- 1) для технических систем – контроль через количественные показатели (время отклика, точность);
- 2) для организационных – оценка по качественным характеристикам (своевременность, полнота);
- 3) для информационных – контроль скорости и качества обработки данных;
- 4) для человеческого фактора – оценка квалификации персонала.

В современных условиях обеспечение транспортной безопасности требует создания комплексного программного решения, способного эффективно управлять безопасностью ОТИ. Разработка такого программного обеспечения позволит создать единую систему контроля и управления, основанную на принципах иерархической оценки защищенности объектов.

Информационная база системы включает несколько ключевых компонентов. Во-первых, это реестр объектов, содержащий полную информацию о всех ОТИ с указанием их категорий по иерархической системе. Во-вторых, это база данных защиты, включающая сведения о всех установленных системах и средствах защиты на каждом объекте. Также система содержит характеристики объектов, включающие данные о физической защищенности,

территориальной расположенности и социальной значимости, и реестр потенциальных угроз с оценкой их вероятности и реестр возможных последствий.

Аналитический модуль обеспечивает комплексную работу с данными. Он собирает и обрабатывает информацию о потенциальных угрозах, оценивает вероятность их возникновения, рассчитывает возможные последствия для каждого объекта и формирует рекомендации по минимизации рисков. Модуль сравнивает существующие меры защиты с актуальными угрозами, выявляет уязвимые места в системе безопасности и генерирует предложения по усилению защиты. На основе анализа формируются планы модернизации систем безопасности. Как итог формируется коэффициент эффективности системы ОТИ, который определяется как:

$$K_c = \frac{OY_{O\text{после}} - OY_{O\text{до}}}{C}, \quad (6)$$

где C – затраты на внедрение мер защиты.

Коэффициент эффективности системы ОТИ в момент времени t будет иметь вид:

$$K_c(t) = \frac{B(t)}{C(t)}, \quad (7)$$

где $B(t)$ – эффект от внедрения мер защиты в момент времени t ;

$C(t)$ – затраты на внедрение мер защиты в момент времени t .

Мониторинг безопасности позволяет отслеживать состояние защищенности объектов в режиме реального времени. Система автоматически ищет уязвимости через постоянный мониторинг объектов. Работает по принципу сравнения текущих показателей с нормативами. При обнаружении отклонений срабатывает триггер и отправляется уведомление ответственным лицам, контролирует выполнение рекомендаций по усилению защиты и анализирует эффективность принятых мер. Также формируются статистические отчеты и проводится сравнительный анализ защищенности объектов.

Система прогнозирования обеспечивает моделирование возможных сценариев развития угроз, оценку их последствий и расчет необходимых ресурсов для реагирования. На основе анализа формируются планы превентивных мероприятий и прогнозируется возникновение новых угроз.

Практическое применение системы включает управление рисками и планирование мероприятий. Управление рисками осуществляется через постоянный мони-

торинг уровня защищенности объектов, оперативное выявление критических уязвимостей и своевременное принятие корректирующих мер. Система помогает оптимизировать распределение ресурсов и формировать приоритеты по модернизации систем безопасности.

Планирование мероприятий включает формирование графиков проверок и инспекций, планирование учений и тренировок персонала, разработку планов модернизации систем защиты, распределение финансовых и технических ресурсов, а также координацию действий различных служб безопасности.

Оперативность реагирования достигается за счет мгновенного выявления незащищенных объектов, автоматической генерации рекомендаций по усилению защиты, формирования приоритетов по модернизации и оперативного планирования необходимых мероприятий. Система быстро адаптируется к новым видам угроз.

Адаптивность системы проявляется в способности учитывать новые виды угроз, возможности корректировки существующих мер защиты, возможности масштабирования под изменяющиеся условия, автоматизации процесса оценки рисков и оперативного обновления баз данных.

Основной алгоритм функционирования системы включает сбор данных о текущем состоянии защищенности объектов, анализ существующих угроз и их вероятности, сравнение имеющихся мер защиты с актуальными угрозами, формирование рекомендаций по усилению безопасности, мониторинг выполнения предложенных мер и корректировку системы защиты при изменении угроз. То есть система работает по принципу: «мгновенно реагируем на то, что видим сейчас, и параллельно анализируем, что может произойти в будущем», что позволяет обеспечить как быструю реакцию на текущие угрозы, так и упреждающее планирование мер защиты.

Ключевые преимущества внедрения системы включают повышение уровня защищенности транспортной инфраструктуры, сокращение времени реагирования на угрозы, оптимизацию затрат на обеспечение безопасности, создание единой системы мониторинга безопасности, улучшение координации между различными службами безопасности, повышение эффективности принимаемых мер защиты, возможность оперативного планирования мероприятий и прозрачность управления безопасностью.

Процесс реализации системы включает подготовку технической документации, разработку программного обеспечения, создание и наполнение баз данных, тестирование всех функциональных модулей, пилотное внедрение на отдельных объектах, корректировку системы на основе полученных результатов, масштабирование на всю транспортную инфраструктуру и обучение персонала работе с системой.

Дальнейшее совершенствование системы предполагает интеграцию с существующими системами безопасности, внедрение искусственного интеллекта для

прогнозирования угроз, развитие мобильных приложений для оперативного реагирования, создание единой информационной платформы, расширение функционала системы и интеграцию с государственными информационными системами.

Внедрение программного комплекса позволит создать динамичную систему управления транспортной безопасностью, способную оперативно адаптироваться к новым угрозам и обеспечивать необходимый уровень защищенности критически важных объектов транспортной инфраструктуры. Система обеспечит прозрачность управления безопасностью, повысит эффективность принимаемых мер и позволит оптимально распределять ресурсы на обеспечение транспортной безопасности.

Благодаря автоматизированной системе управления, ответственные лица смогут в режиме реального времени отслеживать состояние защищенности каждого объекта, оперативно получать информацию о выявленных уязвимостях и принимать своевременные меры по их устранению. Система также позволит формировать приоритетный список объектов, требующих первоочередной модернизации систем безопасности, что особенно важно при ограниченных ресурсах.

Предложенный способ может быть использован как инструмент для принятия управленческих решений [6] в области проектирования и эксплуатации транспортной инфраструктуры в условиях угроз природного и техногенного характера, а в совокупности с созданием математического инструментария для поддержки принятия управленческих решений при автомобильных авариях может значительно сократить риски последствий аварии [7].

Учитывая стратегическую важность ОТИ, необходимо обеспечить максимально высокий уровень защиты информации. Для этого необходимо разработать комплексную систему информационной безопасности.

Список литературы

1. Арефьева Е.В. Методика оценки эффективности мероприятий по реализации государственной программы «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» // Технологии гражданской безопасности. 2016. № 4(50). С. 38-44. EDN: WYPLCP
2. Методика для системной оценки эффективности реализации задач и приоритетных направлений государственной политики в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / И.Ю. Олтян, Е.В. Арефьева, А.С. Котосонов, А.В. Верескун, А.С. Рыдель. // Технологии гражданской безопасности. 2020. Т. 17 № 4(68). С. 30-37. DOI: 10.54234/CST.19968493.2020.17.4.66.5.30 EDN: FEQQEU
3. Арефьева Е.В., Прус Ю.В., Котосонов А.С. Подход к оценке показателей устойчивости систем жиз-

необеспечения населения // Технологии гражданской безопасности. 2024. № 4(82). С. 63-69. EDN: QIDWVL

4. Анализ подходов и методов формирования интегральных индексов риска при работе с паспортами безопасности территорий субъектов / Е.В. Арефьева, Е.В. Муравьева, А.С. Котосонов, Д.В. Полторанов, А.В. Кузьмин // Технологии гражданской безопасности. 2023. № 3(77). С. 50-58. EDN: BXGJCI

5. Котосонов А.С., Арефьева Е.В., Прус Ю.В. Интегральные показатели риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в территориально распределенных природно-технических системах // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21. № 1(79). С. 27-33. EDN: TYGRSU

6. Олтян И.Ю., Арефьева Е.В., Котосонов А.С. Дистанционная оценка интегрального показателя риска чрезвычайных ситуаций // Сборник материалов конференций: Материаловедение и инженерия: Международная конференция по строительству, архитектуре и техносферной безопасности. Сочи: Изд-во IOP Publishing, 2020. Том 962. С. 042053. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042053 EDN: XJGGYQ

7. Воронин А.А., Прус Ю.В. Математическое распознавание аварийных ситуаций с помощью систем датчиков и взаимодействие со службами экстренного реагирования // Материалы XXXI международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем»: сборник статей / под ред. А.А. Калашников, В.В. Кульба. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2023. С. 400-406. DOI: 10.25728/iccss.2023.74.55.055 EDN: KWAZTQ

References

1. Arefyeva E. A Method for Assessing the Effectiveness of Activities to Implement the State Program on Protection of Population and Territories from Emergencies, Provision of Fire Safety and Safety of People on Water Bodies. *Civil Security Technology* 2016;13(4):38-44. EDN: WYPLCP. (in Russ.)

2. Oltyan I., Arefyeva E., Kotosonov A., Vereskun A.V., Rydel A. Methodology for Systematic Effectiveness Evaluation of the State Policy in the Field of the Population and Territories Protection from Natural and Man-Made Emergencies Priority Tasks Implementation. *Civil Security Technology* 2020;17(4(66)):30-37. DOI: 10.54234/CST.19968493.2020.17.4.66.5.30 EDN: FEQQEU. (in Russ.)

3. Arefyeva E., Prus Yu., Kotosonov A. An approach to Assessing Sustainability Indicators of the Population life Support Systems. *Civil Security Technology* 2024;21((82)):63-69. EDN: QIDWVL. (in Russ.)

4. Arefyeva E., Muravieva E., Kotosonov A., Poltoranov D., Kuzmin A. Analysis of Approaches and Methods

for the Formation of Integral Risk Indices When Working with Safety data Sheets of the Territory of the Constituent Entities of the Russian Federation. *Civil Security Technology* 2023;20(3(77)):50-58. EDN: BXGJCI. (in Russ.)

5. Kotosonov A., Arefyeva A., Prus Yu. Integral Indicators of Natural and Man-Made Risk Emergencies in Geographically Distributed Natural Technical Systems. *Civil Security Technology* 2024;21(1(79)):27-33. EDN: TYGRSU. (in Russ.)

6. Oltyan I.Y., Arefyeva E.V., Kotosonov A.S. Remote assessment of an integrated emergency risk index. In: Proceedings of the International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Sochi: IOP Publishing; 2020. Vol. 962. Pp. 042053. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042053 EDN: XJGGYQ. (in Russ.)

7. Voronin A.A., Prus Yu.V. [Mathematical recognition of emergency situations using sensor systems and interaction with emergency response services]. In: Kalashnikov A.A., Kulba V.V, editors. Proceedings of the XXXI International Conference Security Management of Complex Systems. IPU RAS Publishing; 2023. Pp. 400-406. DOI: 10.25728/iccss.2023.74.55.055 EDN: KWAZTQ. (in Russ.)

Сведения об авторе

Александр Андреевич Воронин (Voronin, Alexander Andreevich); Бульвар Павшинский, д. 32, кв. 20, г. Красногорск, Россия, 143410; Российский государственный социальный университет, аспирант; stalkercrow@yandex.ru, Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник», Выпуск № 1 (36) // 31.03.2025

About the author

Alexander A. Voronin, Postgraduate Student, Russian State Social University, Pavshinsky Boulevard, 32, Apt. 20, Krasnogorsk, Russia, 143410; stalkercrow@yandex.ru, *Scientific and Analytical Journal "Siberian Fire and Rescue Bulletin"*, Issue No. 1 (36), March 31, 2025.

Вклад автора в статью

А.А. Воронин – полное авторство, включая: разработку концепции исследования, проведение анализа существующих систем безопасности, разработку новой многоуровневой системы оценки, создание математического аппарата, написание текста статьи, научное редактирование, формирование выводов и рекомендаций.

Конфликт интересов:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Об одной математической модели оценки надежности и обеспечения безопасности полетов при эксплуатации беспилотного воздушного судна

On a mathematical model for assessing reliability and ensuring flight safety when operating an unmanned aerial vehicle

Полтавский А.В., Ахобадзе Г.Н.
Poltavsky A.V., Akhobadze G.N.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
avp57avp@yandex.ru



Полтавский А.В.



Ахобадзе Г.Н.

Резюме. Излагаются теоретические и прикладные аспекты компьютерного моделирования с учетом современных методов построения информационно-измерительных и управляющих систем (ИИиУС) летательных аппаратов (ЛА) при их эксплуатации. Объекты ЛА и ИИиУС являются высокотехнологическими и сложными техническими системами (СТС), требующими комбинированных подходов к их оценке. Показаны пути формирования основных блоков информационных моделей для получения основных показателей надежности и безопасности ЛА. Приводятся формулы к использованию адекватных процессам информационных технологий и методов оценки технического уровня создаваемых образцов как одноуровневых, так и многоуровневых иерархических систем в сочетании с известными методиками, действующими алгоритмами и программным обеспечением, являющиеся более полными по информативности с вероятностными характеристиками. Теоретические аспекты в работе и формулировки подкреплены вычислительным экспериментом, в ходе которого осуществлялась доставка груза ЛА в заданную область. Результаты работы могут быть полезными разработчикам беспилотных авиационных систем и специалистам в сфере проектирования объектов СТС при прогнозировании их технического состояния с оценкой функциональной безопасности и обеспечения желаемой эффективности.

Annotation. The theoretical and applied aspects of computer modeling are described, taking into account modern methods of constructing information, measurement and control systems (IIAs) of aircraft during their operation. The LA and IliUS facilities are high-tech and complex technical systems (CTC) that require combined approaches to their assessment. The ways of forming the main blocks of information models for obtaining the main indicators of aircraft reliability and safety are shown. Formulas are given for the use of adequate information technology processes and methods for assessing the technical level of created samples of both single-level and multi-level hierarchical systems in combination with known methods, operating algorithms and software, which are more complete in information content with probabilistic characteristics. The theoretical aspects of the work and the formulations are supported by a computational experiment, during which the aircraft cargo was delivered to a given area. The results of the work can be useful to developers of unmanned aircraft systems and specialists in the field of designing CTC facilities when predicting their technical condition with an assessment of functional safety and ensuring the desired efficiency.

Ключевые слова: информационная модель, сигналы – события, математическое ожидание, вероятностные показатели, коэффициент груза, вектор скорости, высота полета.

Keywords: information model, event signals, mathematical expectation, probabilistic indicators, load coefficient, velocity vector, flight altitude.

Для цитирования: Полтавский А.В., Ахобадзе Г.Н. Об одной математической модели оценки надежности и обеспечения безопасности полетов при эксплуатации беспилотного воздушного судна // Надежность. 2026. №1 С. 37-43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-37-43>

For citation: Poltavsky, A.V., Akhobadze, G.N. On a Mathematical Model for Assessing Reliability and Ensuring Flight Safety in Unmanned Aerial Vehicle Operation. Dependability 2026;1: 37-43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-37-43>

Поступила: 30.09.2025 / **После доработки:** 06.10.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 30.09.2025 / **Revised on:** 06.10.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

Практически все разработки и образцы авиационной техники предполагают обеспечение необходимыми сведениями и данными для организации управления технологическими процессами в народном хозяйстве, требующими достаточно обширных знаний в целях принятия управленческих решений. Значительную часть в процессе принятия решений при создании или модернизации современных объектов сегодня особую роль отводят средствам информационно-измерительных и управляющих систем (ИИиУС) (блоки ИИиУС составляют две основные компоненты – информационно-измерительная система (ИИС) и управляющая система (УС)), которые являются также сложными техническими системами (СТС) или их частями, они составляют также базис и основу для создания более сложных объектов информационно-управляющей системы (ИУС), находящихся в сети СТС.

Подходы к разработке объектов для СТС и им адекватных информационных моделей анализа, оценивания технического облика СТС могут быть различными. Как правило, многие специалисты в этой области исследований выделяют три основных направления: построение стохастических (вероятностных) моделей, модели для динамических модулей к дальнейшей экспертной оценке и комбинированные (интеграционные и гибридные) модели [1]. Для их анализа и реализации исследователями достаточно часто применяют методы и модели исследования из статистической динамики, стохастической индикации, аппроксимации и др. Наряду с ранее известными методами для получения оценки надежности и качества продукции СТС применяют также множество методов из экспертных оценок (эвристические методы) с различными для них подходами, которые также важны в задачах предварительных испытаний и начального проектирования, особенно тогда когда формализовать адекватные процессам модели объектов СТС достаточно сложно. Поэтому для осуществления получения объективных исследований СТС, реализации интеграционного подхода к оценкам надежности и основных показателей качества требуются ее концептуальное описание, а именно – это создание множества информационных моделей и разработок для адекватной процессам информационной системы (ИС) по принятию решений.

Подход к разработке блоков информационной модели СТС и интеграции методов и моделей основан на технологиях по разработкам современных объектов к средствам ИИиУС, обобщенной модели к показателям, например, для беспилотных средств с оптико-электронными приборами (ОЭП) с возможностями автоматизации процессов для дальнейшей поддержки управленческих решений. Для этих целей создаются множество блоков из информационных и имитационных моделей с привлечением теоретико-множественных и логико-вероятностных методов, ведется и выбор методов экспертных

систем с элементами искусственного интеллекта (ИИ). Как правило, изначально аналитические методы расчета оценок основных показателей качества и функциональной эффективности объектов СТС (комплексы с беспилотными летательными аппаратами – БпЛА с ОЭП и блоки к ИИиУС) построены в сочетании с известными методами из экспертных оценок, разработки алгоритмов ИИ с имитационным моделированием дают возможность организовать целенаправленный поиск как информационный процесс к проектированию им основных характеристик [2]. Покажем это на некоторых актуальных направлениях из разработок информационных и компьютерных моделей для этих сложных систем.

1. Информационная модель

Как известно, на основные измерители к блокам для ИИиУС возложены задачи, которые связаны с применением по функциональному назначению летательных аппаратов (ЛА). Так, например, в модели вероятность вскрытия объекта-цели оценивается формулой $P_{\text{вскр}} = P_{\text{нал}}(1 - P_{\text{обн}})P_{\text{мн}}P_{\text{пр}}P_{\text{расп}}$, в которой: $P_{\text{нал}}$ – вероятность безотказной работы приборов ИИиУС; $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения объекта-цели; $P_{\text{мн}}$ – вероятность нахождения объекта-цели в районе поиска; $P_{\text{пр}}$ – вероятность проявления объекта-цели за время поиска; $P_{\text{расп}}$ – вероятность распознавания объекта-цели. Здесь видим, практически все эти показатели – вероятностные, и еще недостаточны для реализации экспертных методов. Один из путей – необходимо увеличить диапазон и область получения информации создавая динамические и программные модули (ПМ) из математических моделей для адекватных оценок ИИиУС и СТС. Отметим также, что сегодня любая система ИИиУС, в контуре управления которой находится человек и машина (в составе определяющих управляющих звеньев ЛА), является сложной эргатической системой с элементами ИИ. Так, например, если рассматривать беспилотные летательные аппараты, то наблюдается высокий процент происшествий, связанных с ошибкой летчиков-операторов (внешних пилотов). Поэтому разработки моделей оценки надежности и безопасности летательных аппаратов, а также действия операторов, управляющих этими аппаратами при их эксплуатации несомненно являются актуальными.

На примере доставки грузов посредством БпЛА, исследуем моделирование действия внешних операторов этих технических средств, ибо предполагаемое моделирование является не только необходимым процедурой, но и призвано для решения проблемы функциональной безопасности и надежности, а также в целом и функциональной эффективности. Информационная модель строится на адекватности физическим процессам. Традиционные подходы – методы, модели и алгоритмы исследования и разработки для СТС и для блоков ИИиУС – в основном базируются на теории линейных систем, в то время как в действительности

модель объекта управления является далеко нелинейной, нестационарной, а также многосвязной и многоканальной с вероятностными показателями. В этих условиях применяют общепризнанные в научной сфере методы и модели исследования, основанные на теории анализа для стохастических систем – методы стохастической аппроксимации, статистической линейзации, методы интеллектуального управления, методы нейронечеткого управления и др. Большинство моделей для СТС [3] и для объектов ИИиУС создается на фундаментальных принципах этих методов, действующих алгоритмов и созданных программных средств. Так, например, часто используется такой принцип анализа, как качество системы. Как известно, всякое отклонение от выходного сигнала Y системы от требуемого сигнала Y_T вызывает некоторые потери (учитываемые риски), которые в каждом конкретном случае характеризуются функцией потерь $\ell = \ell(Y, Y_T)$. В свою очередь, векторные входной сигнал $X(t)$ и выходной сигнал $Y(t)$ связаны с вероятностями $P(X)$, $P(Y)$ их появления. Поэтому к выходному сигналу $Y(t)$ предъявляются отдельные особые требования в виде требуемого (или часто желаемого для ЛППР) сигнала Y_T , связанного с показателями и характеристиками функционирования СТС и ИИиУС. Эти требования, предъявляемые к ним, состоят в необходимости удовлетворения принятых ограничений в моделировании этих систем и выполнения условий как $E \leq E_T$, здесь символ $E = f(|Y - Y_T|)$ – величина, определяющая потребную степень близости для векторов входного и выходного сигналов. Случайные сигналы-события X и Y , являющиеся сложными, характеризуются вероятностями и представляются в динамических модулях (отдельными блоками) информационной системы в общепринятом виде [4]. Использование вероятностного выражения дало возможность предположить, что входные события – сигналы X_1, X_2, \dots, X_n могут составить полную группу событий в модели к динамическим модулям. А также, при условии, когда событие-сигнал Y может появиться вместе с одним из несовместных событий X_1, X_2, \dots, X_m , составляющих полную группу, получим выражение, как $P(Y) = \sum_{i=1}^m P(X_i)P(Y/X_i)$. Отметим также здесь, что случайные сигналы-события X и Y во времени – это случайные функции $X=X(t)$, $Y=Y(t)$, которые характеризуются соответствующими им математическим ожиданием (МО) $M[X(t)] = m_x(t)$ и дисперсией $D_x(t)$, а также корреляционной функцией динамического модуля в ИС. Эти зависимости (для модели входного сигнала) можно представить формулой с математическим ожиданием-МО в следующем общепринятом виде [5]

$$M[X(t)] = m_x(t) = \begin{pmatrix} m_1^{(x)}(t) \\ m_2^{(x)}(t) \\ \vdots \\ m_m^{(x)}(t) \end{pmatrix},$$

где $m_1^{(x)}(t), m_2^{(x)}(t), \dots, m_m^{(x)}(t)$ – компоненты МО. В тоже время согласно формуле, представленной также в [2, 3], МО связано с корреляционной функции информационного процесса.

Для выходного сигнала $Y(t)$ в принятой информационной модели все выкладки и процедуры будут аналогичные. Для оценки динамики систем (подсистем) и процесса в ИИиУС и СТС наиболее информативными показателями являются именно входной и выходной сигналы, такое определение является общим и предельно справедливым для этих сложных систем.

При заданных характеристиках X и Y_T показатель качества системы, как мера близости измерений Y и Y_T будет изменяться при изменении условного оператора. Таким образом, сближение векторов Y и Y_T – это есть управление качеством ИИиУС и СТС. Отметим, что сигналом Y_T может быть выходной сигнал для реальной системы (или модели), или сигнал идеальной (абстрактно-теоретической) системы, а также может, принят сигнал из эталона в соответствующей шкале измерений. Как мы уже выше отметили, измерителем отклонения в модели принята функция потерь (как штраф) – $\ell(Y, Y_T)$, она связана с некоторым событием θ , которое подразумевает собой функциональные возможности для самой системы:

$$\ell(Y, Y_T) = \begin{cases} \ell_1 & \text{при } \bar{\theta}, \\ 0 & \text{при } \theta, \end{cases}$$

где ℓ_1 – величина потерь. Событие θ , как отмечено, является сложным событием и, кроме близости векторов Y и Y_T , учитывает Λ ограничений $\theta = \prod_{i=0}^{\Lambda} \theta_i$, здесь θ_0 – событие, состоящее в требовании к близости векторов Y и Y_T ; θ_i – событие, удовлетворяющее i -му ограничению ($i = \overline{1, \Lambda}$). Как видим из этих выкладок, требуется обеспечить максимум вероятности события θ , т.е. $P(\theta) = \max$, что также необходимо в задачах оптимизации и принятия управленческих решений в информационных блоках-модулях ИС.

Требования к современной продукции ИИиУС и СТС – это, прежде всего, высокое качество и эффективность выполнения поставленных задач, а также безопасность применения в любое время года и суток, информативность каналов, мобильность, многоканальность, интеграция оптических приборов, радиолокационных устройств, надежность механических узлов, электронных схем, программ и т.д. Эти требования должны обеспечивать устойчивость получаемой информации и организации управления в широких условиях применения СТС и ИИиУС по назначению.

Случайность события θ , как отмечено, является следствием множества воздействий на СТС и ИИиУС и связана с функцией потерь (средним риском). Как правило, оценивание потерь производится с помощью моделей (большинство систем СТС и ИИиУС сегодня рассматриваются как стохастические) с возможностью

определения их возможных технических условий (ВТУ) с целью выявления степени пригодности к функционированию. Вероятностные показатели и основные характеристики (случайные и неслучайные) являются важными при оценке качества продукции на всех этапах жизненного цикла СТС. Их получают на научно-технологической платформе теоретико-вероятностных методов. В комплекс процедур принятия решений одним из важных этапов по формированию действующих программ создания систем СТС и ИИиУС включен этап совместного выбора вариантов (и их технического облика) и непосредственно состава исследуемой системы на множестве подсистем (и программных модулей)

$M^* = \bigcup_i^k M_i$, что позволяет сократить время и затраты на разработку. Для данного важного этапа характерно то, что появляется возможность выбора наиболее рациональных проектных решений из множеств подходов. Наряду с известными подходами к оценке ВТУ блоков ИИиУС и для СТС сегодня также широко используются интеллектуальные методы, связанные информационно-энтропийными показателями проводимых испытаний и оценками измерений. Комплексное (системное и интеграционное) моделирование [6] может значительно повысить информативность и достоверность оценок основным показателям качества с ВТУ, что собственно и позволяет выбрать наиболее рациональный путь создания образцов для СТС, в частности многофункциональных комплексов БпЛА и ИИиУС, которые часто рассматриваются как продукция двойного назначения (для задач народного хозяйства и силовых ведомств). Покажем одну из возможных схем создания модели для предварительных испытаний и решении основной задачи для многофункционального БпЛА – доставка грузов в заданную область пространства.

2. Компьютерное моделирование

Одной из важных функциональных задач для ИИиУС и для БпЛА является обеспечение доставки различных грузов в заданную область пространства. Основу блока анализа системы (БАС) составляет математическую модель для анализа такой доставки. Запишем уравнения к анализу движения некоторого груза *Б* к БАС, доставляемого БпЛА в проекциях на оси общепринятых измерений *x* и *y* (на первичном этапе процесса рассматривается простая детерминированная модель к информационному блоку БАС для вертикальной плоскости оцениваемого движения беспилотного объекта):

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= -R \cos \theta_v; \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= -R \sin \theta_v - mg, \end{aligned} \quad (1)$$

где *m* – масса груза, транспортируемого БпЛА;
g – ускорение свободного падения;

$$R = C_x S_k \rho \frac{V^2}{2} - \text{сила лобового сопротивления грузу } B;$$

C_x, S_k, ρ, V – коэффициент сопротивления, площадь поперечного сечения, плотность воздуха и скорость груза соответственно;

θ_v – угол отклонения вектора скорости \bar{V} от горизонта;
 $V_x = V \cos \theta_v, V_y = V \sin \theta_v$ – соответственно моделируемым процессам в ИС горизонтальная и вертикальная составляющие вектора скорости груза, которые в блоке анализа БАС определяются по следующим формулам:

$$\bar{V} = \bar{V}_x + \bar{V}_y; V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}; \theta_v = \arctg \frac{V_y}{V_x}.$$

Для того, чтобы решить уравнения (1) на ПЭВМ, их следует привести к системе Коши (к уравнениям (2), положив постоянным коэффициент для груза (*B*) $K_B = (C_x S_k \rho) / 2m$)

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_x; \\ \frac{dy}{dt} &= V_y; \\ \frac{dV_x}{dt} &= -K_B * V * V_x; \\ \frac{dV_y}{dt} &= -K_B * V * V_y - g. \end{aligned} \quad (2)$$

Данные уравнения решают по шагам, если задаться интервалом времени (или шагом) $dt \approx \Delta t$. Для начального шага интегрирования (2) ($t(0) = 0$) получим алгоритм для решения на ПЭВМ

$$\begin{aligned} t &= t + \Delta t; \\ x &= x + V_x * \Delta t; \\ y &= y + V_y * \Delta t; \\ V_x &= V_x - (K_B * V * V_x) * \Delta t; \\ V_y &= V_y - (K_B * V * V_y + g) * \Delta t; \\ V &= \text{SQRT}(V_x^2 + V_y^2). \end{aligned} \quad (3)$$

Условием окончания интегрирования (3), когда $y(k)$ будет находиться между шагом $y(n)$ и $y(n+1)$, принято $(y_n - y_k) * (y_{n+1} - y_k) \leq 0$. Для испытаний модели (2) приведем также рабочую формулу (полагая $V = V(0) \approx const$) в вертикальной плоскости бросания груза с выбором осей оценки измерений *x* и *y* (с изначальной точкой отсчета измерений и моделируемой высоты бросания груза *H* с беспилотного воздушного судна (БпЛА))

$$\begin{aligned} y &= H + \frac{g}{K_B^2 * V^2} * [\ln(1 - K_B * x) + K_B * x], \\ K_B &= \frac{C_x S_k \rho}{2m}. \end{aligned} \quad (4)$$

Результаты имитационного (компьютерного) моделирования представлены на рис. 1. Расчет в информацион-

ной системе производился для груза массой $m = 100$ кг, груз «сбрасывали» с высоты полета $H = 2$ км при горизонтальном полете БПЛА (как полет «на площадке») со скоростью полета беспилотного воздушного судна $V_0 = 200$ м/с; начальные условия (н.у.) принимались следующими: $g = 9,81$ м/с², $C_x = 0,25$, $\rho = 1,22$ кг/м³, $S_k = 0,07$ м², $x(0) = 0$, $y(0) = H$, $\theta_v(0) = 0$.

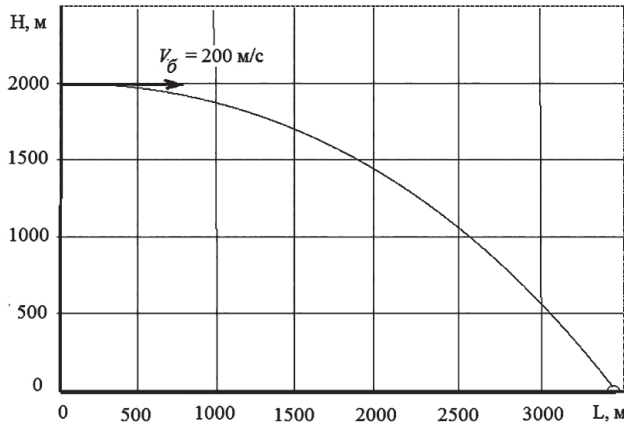


Рис. 1. Имитационное моделирование доставки груза с помощью БПЛА

Следующие «имитационный полет» и расчеты (рис. 2) в ИС доставки груза массой $m = 500$ кг проводились по условию его сброса с высоты полета БПЛА в $H = 2,8$ км (принималось, что выполнялся полет также «на площадке») со скоростью судна БПЛА $V_0 = 285$ м/с). Из рисунков видно, что дальность полета груза к объекту-цели увеличивается с высотой полета БПЛА на момент сбрасывания и также зависит от его скорости, точность попадания груза в заданную область геопространства также зависит от углов ориентации положения груза и самого судна БПЛА (на момент сброса груза с борта БПЛА).

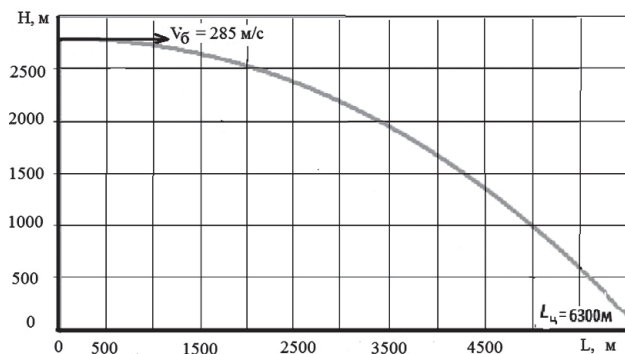


Рис. 2. Компьютерное моделирование доставки груза БПЛА в заданную область массой 500 кг (груз был сброшен с высоты полета беспилотного воздушного судна 2,8 км)

Приведенные выше выражения далее в ИС преобразованы в стохастическую модель путем добавления к уравнениям случайных составляющих из блока условий применения. В качестве события θ принималось условие попадания груза в приведенный круг с радиусом

$R_n = 5$ м, расположенному на поверхности земли, вероятность попадания в заданный круг оценивалась по формуле $P_{oi} = P_{oi}(\rho_r \leq R_n)$, здесь символ $\rho_r = E_r$ — промах груза относительно моделируемого центра объекта-цели (момент для времени «встречи» с объектом-целью t_r).

3. Обсуждение

Оценка точности динамических систем базируется на определении законов распределения Y , Y_T [7-9]. Обычно принято, что положительный корень из величины η (величина непосредственно связана с векторами Y , Y_T) называют критерием средней квадратической ошибки, а сама величина η представляет собой начальный момент второго порядка и может быть выражена через математическое ожидание и дисперсию. Если рассматривать промах груза как текущую величину и случайную функцию во времени при подлете к цели, то здесь к оценке доставки груза применяют, как принято в автоматических системах, формулу для средней квадратической ошибки, которую к информационным блокам в ИС (нижний индекс при символе E оценки промаха груза пока опустим) обуславливают следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 E(t) &= m_E(t) + \overset{0}{E}(t), \quad m_E(t) = M[E(t)], \\
 \overset{0}{E}(t) &= E(t) - m_E(t), \\
 E^T(t) &= m_E^T(t) + \overset{0}{E}^T(t) \rightarrow \\
 \rightarrow M \left[\left(m_E^T(t) + \overset{0}{E}^T(t) \right) \left(m_E(t) + \overset{0}{E}(t) \right) \right] &= \\
 m_E^T(t) m_E(t) + M \left[\overset{0}{E}^T(t) m_E(t) \right] + M \left[m_E^T(t) \overset{0}{E}(t) \right] + & \\
 + D_E(t) \left\{ \begin{aligned} M \left[\overset{0}{E}^T(t) m_E(t) \right] &= 0 \\ M \left[m_E^T(t) \overset{0}{E}(t) \right] &= 0 \end{aligned} \right. \rightarrow & \\
 \eta(t) = m_E^T(t) m_E(t) + D_E(t) \rightarrow \sigma_0 = \sqrt{\eta(t)} = & \\
 = \sqrt{m_E^2(t) + \sigma_E^2(t)}. & \quad (5)
 \end{aligned}$$

Таким образом, как видно, в блоках моделирования системы следует обеспечить

$$f(m_E, D_E) = f(M[E], D[E]) = \text{extremum}. \quad (6)$$

Приведенный фрагмент испытаний одного из модулей динамической модели БПЛА является неотъемлемой частью информационных блоков к оценке технического уровня СТС в ИС.

Как правило, модель системы наведения БПЛА с блоками ИИиУС состоит из двух контуров управления – первый контур – это внешний контур управления траекторией движения воздушного судна, а второй контур – внутренний контур, состоящий из каналов управления

перегрузкой и стабилизации углового положения. Разнообразие систем управления для БПЛА, прежде всего, определяется методом наведения. Состав из датчиков (и геодатчиков) для системы автоматического управления и для блоков ИИиУС как основных объектов в автоматических устройствах многоцелевого БПЛА также будет определяться методом наведения.

При учете доставки груза в заданную область с подвижными координатами цели (объект-цель является подвижным) в (2) и алгоритм (3) следует добавить модель ее движения и уточнить формулу для проведения оценки к ошибкам доставки груза (в заданную область). Изложенный выше агрегативно-декомпозиционный подход к моделированию СТС и ИИиУС направлен на разработки по созданию систем поддержки управленческих решений, а также на совершенствование методов оптимизации и имитационного моделирования этих объектов с целью повышения их эффективности еще на ранних этапах замысла проекта.

Заключение

Количество беспилотных авиационных систем постоянно увеличивается, технологические аспекты технические решения для них – это улучшение системы наведения, повышение устойчивости к помехам и др. Одной из актуальных и важнейших задач для развития измерительных информационных технологий является расширение номенклатуры измеряемых величин, обеспечение адекватных процессам измерений в условиях воздействия внешних факторов этим СТС. Поиск решений для этих задач связано с усложнением структуры средств измерений; созданием комплексов взаимосвязанных средств измерений и технических средств, необходимых для их функционирования [10, 11]. Также, современные объекты ИИиУС и СТС характеризуются большим количеством параметров, требующие контроля и прогнозирования. Для получения информации о параметрах объекта, необходимо проводить комплексные измерения, а значения измеряемых величин получать расчетным путем на основе функциональных зависимостей между ней и величинами, подвергаемыми измерениям. Такие задачи успешно решаются с помощью информационных измерительных систем, получивших свое широкое распространение. Традиционные измерительные подсистемы обладают основными признаками средств измерений и являются их разновидностью, они рассматриваются как составная часть более сложных структур – ИИС, реализующие уже более расширенные функции: измерительные, информационные, логические, диагностики, контроля, вычислительные и др., они связаны непосредственно с задачами УС и организацией управления объектов СТС.

В современных системах ИИиУС и СТС измерительные каналы для них, как правило, выделяют в отдельную подсистему с принятыми границами как со стороны входа, так и со стороны выхода. Априорная область

поиска, как правило, задается из физических соображений (часто от разных компетенций ЛПР) и является экспертно-эвристической в ИС. Все это также требует разработок информационных моделей, математического обеспечения, создания блоков из прикладных программных средств с элементами ИИ, которые часто являются достаточно трудоемким, дорогостоящим процессом и элементами из объектов для всей СТС.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- показаны теоретические подходы и получены оценочные вероятностные характеристики входных случайных сигналов, характеристики выходных, позволяющие прогнозирование функциональной безопасности для беспилотных ЛА (и определить техническое состояние);
- представлен один из возможных подходов и схем к построению математической модели многоцелевым БПЛА с целью определения основных показателей и основных технических характеристик при применении его для решения разных народнохозяйственных задач;
- на базе созданной имитационной модели разработан и исследован алгоритм доставки груза летательным аппаратом в заданную область с подвижными и неподвижными координатами.

В заключении также отметим то, что теория надежности является неотъемлемой частью для интенсивно развивающейся теории безопасности объектам СТС и ИИиУС, которая призвана определять качественные и количественные показатели (и критерии) при исследовании на основе создания систем ИС, организации управления и поиска защиты от опасностей (учет возможных рисков в информационном моделировании СТС). Также отметим и то, что в настоящий период времени, многие известные ИС для СТС претерпевают свои изменения и развиваются в направлении разработок объектов гибридных интеллектуальных ИС (ГИИС)

Список литературы

1. Пугачев В.С., Синицин И.Н. Структурная теория сложных стохастических систем. Информатика и ее применение, 2011. Т.5. Вып. 2. С. 4-16. EDN: NXKRQZ
2. Самков Т.Д. Теория принятия решений: лекции. Новосибирск: НГТУ, 2010. 107 с.
3. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Системный подход к проектированию сложных технических систем // Оборонная техника. 2013. № 9-10. С. 28-32.
4. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2000. 528 с.
5. Борисенок С.В. Корреляционные функции в управляемых системах нелинейной динамики // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2006. № 6(15): Физика. С. 229-243.
6. Северцев Н.А., Юрков Н.К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла: монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.

7. Крянев А.В., .В. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2010. 280 с. EDN: MUWSOD
8. Петров В.П. Информационные системы. СПб.: Питер, 2002. 688 с.
9. Гладков Д.И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. М.: Энерго-атомиздат, 1984. 256 с.
10. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия согласованных решений. // Приложение к журналу Информационные технологии. 2002. № 3. 24 с.
11. Дедков В.К. Оптимизация технического решения при проектировании системы. // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 2. С. 10-14. EDN: SENCQL

References

1. Pugachev V.S., Sinityn I.N. Theory of complex stochastic systems. *Inform. Primen.* 2011;5(2):4–16. (in Russ.)
2. Samkov T.D. Theory of decision-making: lectures. Novosibirsk: NSTU; 2010. (in Russ.)
3. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. [A systematic approach to the design of complex technical systems]. *Oboronnaya tekhnika* 2013;9-10:28-32. (in Russ.)
4. Ugryumov E.P. [Digital circuit engineering]. St. Petersburg: BHV – St. Petersburg; 2000. (in Russ.)
5. Borisenok S.V. [Correlation functions in controlled systems of nonlinear dynamics]. *Proceedings of the Herzen University. Physics* 2006;6(15):229-243. (in Russ.)
6. Severtsev N.A., Yurkov N.K. [Safety of dynamic systems at the stages of the life cycle: a monograph]. Penza: PSU Publishing; 2023. (in Russ.)
7. Kryanev A.V. [Metrical analysis and data processing]. Moscow: Fizmatlit; 2010. EDN: MUWSOD. (in Russ.)
8. Petrov V.P. [Information systems]. Saint-Petersburg: Piter; 2002. (in Russ.)
9. Gladkov D.I. [Optimization of systems by non-gradient random search]. Moscow: Energo-atomizdat; 1984. (in Russ.)

10. Trakhtenherts E.A. [Computer support for making coordinated decisions]. *Appendix to the Informatsionnye Tekhnologii journal* 2002;3. (in Russ.)

11. Dedkov V.K. [Optimisation of the technical solution in the design of the system]. *Reliability and quality of complex systems* 2013;2:10-14. EDN: SENCQL. (in Russ.)

Сведения об авторах:

А.В. Полтавский – д.т.н., ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). Контактный телефон: 8-905-72-777-39

Г.Н. Ахобадзе – д.т.н., ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). Контактный телефон: 8-905-72-777-39

About the authors:

A.V. Poltavsky, Doctor of Engineering, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (IPU RAS). Contact phone number: 8-905-72-777-39

G.N. Akhobadze, Doctor of Engineering, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (IPU RAS). Contact phone number: 8-905-72-777-39

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в подготовку данной работы. Концептуализация, разработка методологии, проведение исследования, анализ данных и написание рукописи осуществлялись всеми авторами совместно.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Методика оценки безотказности РЭА в условиях меняющейся температуры окружающей среды

Methodology for assessing the radioelectronic equipment reliability in conditions of changing ambient temperature

Кириллов Л.Р.^{1,2*}, Лужавин Ю.И.²
Kirillov L.R.^{1,2*}, Luzhavin Yu.I.²

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского», Российская федерация, Нижний Новгород

² ООО «Радио Гигабит», Российская федерация, Нижний Новгород

¹ National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russian Federation, Nizhni Novgorod

² Radio Gigabit, Russian Federation, Nizhni Novgorod

* leonidkirillov000@gmail.com, luzhavin@rambler.ru



Кириллов Л.Р.



Лужавин Ю.И.

Резюме. Общепринятая методика расчета показателей безотказности радиоэлектронной аппаратуры, предлагаемая российскими и зарубежными стандартами по оценке надежности, не учитывает изменение температуры окружающей среды во времени. Для радиоэлектронной аппаратуры, непрерывно эксплуатируемой в течение года или нескольких лет в меняющихся климатических условиях (например, на улице), данный подход может быть неточным. Это связано с тем, что коэффициент температуры, учитывающий термическую нагрузку, зависит от температуры нелинейно. Поэтому для более точной оценки безотказности радиоэлектронной аппаратуры необходимо учитывать в расчетах вариации температуры. **Цель.** Предложить метод оценки безотказности радиоэлектронной аппаратуры при непрерывной эксплуатации на улице, учитывающий изменения температуры во времени. **Методы.** В статье применяются методы статистической теории надежности, математического анализа и численные методы. **Результаты.** Предложена методика оценки безотказности радиоэлектронной аппаратуры, учитывающая изменения температуры во времени. Представлена математическая модель, описывающая изменения температуры окружающей среды в течение года, на основе которой можно рассчитать интенсивность отказов радиоэлектронной аппаратуры при непрерывной эксплуатации в уличных условиях. С использованием предложенного метода рассчитана эксплуатационная интенсивность отказов микросхемы ПЗУ объемом 16 Мегабит, выполненной по NMOS-технологии, при эксплуатации непрерывно на улице в течение года. Проведена количественная оценка неточности результатов расчета интенсивности отказов при применении методики, не учитывающей вариации температуры. Показана зависимость расхождения результатов от значений энергии активации и рабочей температуры. **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет рассчитывать безотказность радиоэлектронной аппаратуры с учетом изменения температуры во времени. На основе предложенной методики можно более точно рассчитать интенсивность отказов радиоэлектронной аппаратуры при непрерывной эксплуатации в уличных условиях.

Abstract. The generally accepted methodology for calculating reliability indicators, proposed by Russian and foreign reliability assessment standards, does not take into account changes in ambient temperature over time. For the radioelectronics that continuously operate for a year or several years in changing climatic conditions (for example, outdoors), this approach may be inaccurate. This is due to the fact that the temperature coefficient, which takes into account the thermal stress, depends on temperature non-linearly. Therefore, for a more accurate assessment of reliability, temperature variations must be taken into account in the calculations. **Aim.** To propose a method for assessing reliability during continuous outdoor operation, taking into account temperature changes over time. **Methods.** The article uses methods of the statistical reliability theory, mathematical analysis and numerical methods. **Results.** A method for assessing the reliability is proposed, taking into account temperature changes over time. A mathematical model is presented that describes changes in ambient temperature throughout the year, on the basis of which it is possible to calculate the failure rate of the radioelectronics during continuous operation in outdoor conditions. Using the proposed method, the operational failure rate of a 16 Megabit ROM chip made using NMOS technology is calculated when operating continuously outdoors for a year. A quantitative assessment of the discrepancy between the results of calculating the failure rate when using a technique that does not take into account temperature variations has been carried out. The dependence of the discrepancy between the results and the values of the activation energy and the operating

temperature is shown. **Conclusion.** The approach proposed in the article makes it possible to calculate the reliability, taking into account temperature changes over time. Based on the proposed methodology, it is possible to more accurately calculate failure rate during continuous operation in outdoor conditions.

Ключевые слова: надежность, безотказность РЭА, интенсивность отказов, термическая нагрузка.

Keywords: dependability, radioelectronic equipment reliability, failure rate, thermal stress.

Для цитирования: Кириллов Л.Р., Лужавин Ю.И. Методика оценки безотказности РЭА в условиях меняющейся температуры окружающей среды // Надежность. 2026. №1 С. 44-48. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-44-48>

For citation: Kirillov, L.R., Luzhavin, Yu.I. Methodology for assessing the radioelectronic equipment reliability in conditions of changing ambient temperature. Dependability 2026;1: 44-48. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-44-48>

Поступила: 01.10.2025 / **После доработки:** 12.11.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 01.10.2025 / **Revised on:** 12.11.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

В связи с постоянным развитием радиоэлектроники растет актуальность задач, связанных с проектированием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Одной из приоритетных задач на всех стадиях жизненного цикла РЭА является обеспечение надежности. Важность данной задачи обусловлена тем, что надежность во многом определяет экономическую эффективность разработки и серийного производства изделия.

Существует два основных подхода к оценке надежности технических устройств. В одном случае отказы рассматриваются как случайные события и описываются методами теории вероятности и статистической теории надежности [1, 2]. В другом случае отказ рассматривается не как случайное событие, а как результат потери материалами своих свойств при протекании в них физических и химических процессов. На основе прогнозирования таких изменений строится теория, называемая физикой отказов [3]. В рамках данной работы рассматриваются вопросы статистической теории надежности.

Одним из ключевых аспектов надежности является безотказность. Безотказность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки [4]. В данной работе предлагается подход, позволяющий проводить более точную оценку безотказности РЭА, эксплуатируемой в условиях меняющейся температуры. В качестве частного случая рассмотрена эксплуатация аппаратуры в уличных условиях.

1. Общепринятый подход к оценке безотказности РЭА

Основные количественные показатели безотказности – это интенсивность отказов и наработка на отказ. Они связаны между собой следующим соотношением [5]:

$$T = \frac{1}{\lambda_s},$$

где T – средняя наработка на отказ, λ_s – эксплуатационная интенсивность отказов.

Поток отказов РЭА складывается из независимых потоков отказов электрорадиоизделий (ЭРИ), расчет интенсивности отказов проводится по формуле:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

где λ_i – эксплуатационная интенсивность отказов i -го ЭРИ.

Данная формула подразумевает, что отказ любого ЭРИ приводит к отказу аппаратуры в целом.

В соответствии с общепринятой методикой, рекомендуемой отечественными и зарубежными стандартами по надежности [6–8], эксплуатационная интенсивность отказов ЭРИ может быть определена по формуле:

$$\lambda_s = \lambda_0 \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_T \cdot K_{\Sigma},$$

где λ_0 – базовая интенсивность отказов конкретного типа ЭРИ;

K_{np} – коэффициент приемки, отражающий уровень качества изготовления ЭРИ;

K_p – коэффициент электрической нагрузки;

K_T – коэффициент термической нагрузки;

K_{Σ} – коэффициент жесткости условий эксплуатации, учитывающий механическую нагрузку.

Коэффициент температуры можно определить по формуле, основанной на модели Аррениуса [6–8]:

$$K_T = e^{\frac{E_a}{k} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right]},$$

где $T_0 = 40 + 273 = 313$ – референсная температура (в Кельвинах);

T_1 – рабочая температура (в Кельвинах);

E_a – энергия активации, эВ;

$k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана.

Более подробную информацию о параметрах λ_0 , K_{np} , E_a , K_{Σ} и K_T можно найти в литературных источниках [6–8].

2. Учет вариаций температуры окружающей среды при оценке безотказности ЭРИ

Показатели безотказности принято оценивать при постоянной температуре окружающей среды. Данный подход вполне подходит для изделий, эксплуатируемых в помещениях, где температура с течением времени почти не меняется. Применение такого подхода также разумно для РЭА авиационного назначения, поскольку аппаратура непрерывно работает короткими промежутками времени (как правило, несколько часов). При эксплуатации в таких условиях вполне целесообразно не учитывать динамические изменения термической нагрузки.

Для аппаратуры, непрерывно эксплуатируемой в течение года или нескольких лет в меняющихся климатических условиях (например, на улице), данный подход может быть неточным. Это связано с тем, что коэффициент температуры, учитывающий термическую нагрузку, зависит от температуры нелинейно. Таким образом, при проведении расчетов показателей безотказности необходимо учитывать вариации температуры.

Применив теорему о среднем, можем найти среднюю интенсивность отказов ЭРИ на интервале времени $[t_1, t_2]$ при меняющемся коэффициенте температуры:

$$\bar{\lambda}_3 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda_\sigma \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_T(t) dt}{t_2 - t_1},$$

где $K_T(t)$ – закон изменения температурного коэффициента на интервале времени $[t_1, t_2]$.

Рассмотрим случай, когда электрическая нагрузка на ЭРИ постоянна в течение эксплуатации. Тогда

$$\bar{\lambda}_3 = \lambda_\sigma \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_\Sigma \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} K_T(t) dt}{t_2 - t_1} = \lambda_\sigma \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_\Sigma \cdot \bar{K}_T,$$

где \bar{K}_T – средний коэффициент температуры на интервале времени $[t_1, t_2]$.

Задав функцию изменения температуры во времени $T_1(t)$, можно определить средний температурный коэффициент:

$$\bar{K}_T = \frac{\int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1(t)} \right)} dt}{t_2 - t_1}.$$

Таким образом, формула интенсивности отказов ЭРИ примет вид:

$$\bar{\lambda}_3 = \lambda_\sigma \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1(t)} \right)} dt}{t_2 - t_1}.$$

3. Влияние вариаций температуры на безотказность ЭРИ при непрерывной эксплуатации в уличных условиях

Рассмотрим случай непрерывной эксплуатации РЭА на улице. Изменение температуры ЭРИ в таких условиях предлагается представить следующим образом:

$$T_1(t) = T_{cp} + T_{дн} \sin(2\pi t) + T_{лз} \sin\left(\frac{2\pi t}{365} - \frac{\pi \cdot t_m}{365}\right),$$

где T_{cp} – среднегодовая рабочая температура ЭРИ;

$T_{лз}$ – амплитуда колебаний средней температуры «лето-зима»;

$T_{дн}$ – амплитуда колебаний температуры «день-ночь»;

t_m – самый теплый день в году.

Данная математическая модель учитывает общий характер колебаний температуры при эксплуатации в уличных условиях. Безусловно, температура окружающей среды – случайная величина, однако, представив ее в виде детерминированной функции, можно, производя несложные вычисления, получить достаточно правдоподобную оценку средней термической нагрузки.

Рассмотрим климат города Нижнего Новгорода [9]:

- среднегодовая температура воздуха – около 5°C;
- самый теплый месяц – июль;
- средняя температура в июле – около 20°C.
- среднесуточный максимум в июле – около 25°C.
- среднесуточный минимум в июле – около 15°C.

На основе данных сведений можем считать, что $T_{дн} = 5^\circ\text{C}$, $T_{лз} = 15^\circ\text{C}$, $t_m = 182$. Примем допущение,

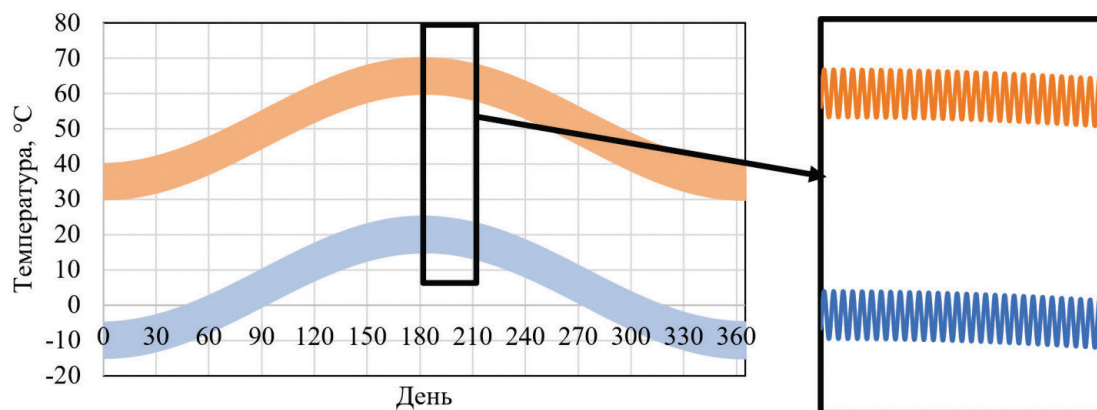


Рис. График вариаций температуры в течение года

Табл. Неточность общепринятой методики

$T_{cp}, ^\circ C$	$E_a, \text{эВ}$									
	0,05	0,10	0,15	0,22	0,28	0,35	0,40	0,45	0,56	0,7
	Неточность, %									
50	< 1	< 1	1	3	5	8	11	14	23	37
60	< 1	< 1	1	2	4	7	9	12	20	32
70	< 1	< 1	1	2	4	6	8	11	18	29
80	< 1	< 1	1	2	3	6	7	10	15	25

что средняя рабочая температура ЭРИ $T_{cp} = 50^\circ C$ (при температуре воздуха $5^\circ C$). Тогда закон изменения температуры ЭРИ во времени можно представить следующим образом:

$$T_1(t) = 50 + 5 \cdot \sin(2\pi t) + 15 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{365} - \frac{\pi \cdot 182}{365}\right)$$

На рис. проиллюстрированы вариации температурного режима ЭРИ, где голубым цветом показано изменение температуры окружающей среды, а оранжевым – изменение температуры ЭРИ.

Попробуем рассчитать интенсивность отказов ПЗУ объемом 16 Мегабит, выполненной по NMOS-технологии. В соответствии с [6] для выбранного типа ЭРИ: $\lambda_0 = 65 FIT$ (FIT – единица измерения интенсивности отказов, равная 10^{-9} 1/ч), $E_a = 0,7$ эВ. Коэффициент электрической нагрузки для данного типа ЭРИ не задается, коэффициент качества и коэффициент эксплуатации примем равными 1.

Проведем расчет без учета вариаций температуры. Коэффициент термической нагрузки при рабочей температуре $50^\circ C$ равен $K_T = 2,2$. Эксплуатационная интенсивность отказов в таком случае $\lambda_s = 143 FIT$.

Проведем расчет по методике, учитывающей вариации температуры. Средний коэффициент термической нагрузки при средней рабочей температуре $50^\circ C$ равен $K_T = 3$. Эксплуатационная интенсивность отказов в таком случае $\lambda_s = 195 FIT$.

Разница в результатах около 37%. Таким образом, для выбранного типа ЭРИ расхождение в результатах довольно ощутимо. Стоит отметить, что для других типов ЭРИ отличие может быть не так существенно. Разница зависит от средней рабочей температуры и энергии активации. Неточность результатов общепринятой методики при различных значениях энергии активации и средней рабочей температуры приведена в табл.

Таким образом, для расчета интенсивности отказов типов ЭРИ с $E_a < 0,3$ эВ допустимо использовать метод, не учитывающий вариации температуры, поскольку неточность составит не более 5%.

Выводы

Предложен метод расчета безотказности РЭА, учитывающий изменения температуры окружающей среды во времени. Представлена математическая модель изменения температуры, которая позволяет рассчитывать интенсивность отказов ЭРИ при эксплуатации РЭА в

уличных условиях. Рассчитана интенсивность отказов микросхемы ПЗУ объемом 16 Мегабит, выполненной по NMOS-технологии. Проведена количественная оценка неточности результатов расчета интенсивности отказов при применении общепринятой методики, не учитывающей вариации температуры. Показана зависимость расхождения результатов от значений энергии активации и рабочей температуры.

Список литературы

1. Маликов И.М., Половко А.М., Романов Н.А. и др. Основы теории и расчета надежности: Изд. 2-е, доп. Л.: Судпромгиз, 1960. 144 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
3. Меламедов И.М. Физические основы надежности (Введение в физику отказов). Л.: Энергия, 1970. 152 с.
4. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения (Статус: заменен). М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 32 с.
5. ГОСТ Р 27.013-2019 Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 41 с.
6. Telcordia SR-332 Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment / Telcordia Technologies, Inc. Issue 4. March 2016.
7. MIL-HDBK-217F Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment. Notice 2. December 1991.
8. Надежность электрорадиоизделий, 2002: справочник / С.Ф. Прытков [и др.] М.: ФГУП «22 ЦНИИИ МО РФ», 2004. 574 с.
9. Нижний Новгород [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Нижний_Новгород (Дата обращения: 26.09.2025).

References

1. Malikov I.M., Polovko A.M., Romanov N.A. et al. [Fundamentals of the theory and calculation of reliability: 2nd ed., extended]. Leningrad: Sudpromgiz; 1960. (in Russ.)
2. Polovko A.M., Gurov S.V. [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2006. (in Russ.)
3. Melamedov I.M. [The physical foundations of reliability (Introduction to the physics of failures)]. Leningrad: Energiya; 1970. (in Russ.)

4. ГОСТ 27.002-89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions. Moscow: Izdatelstvo standartov; 2002. (in Russ.)

5. GOST 27.013-2019. Dependability in technics. Reliability assessment methods. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

6. Telcordia SR-332 Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment. Telcordia Technologies, Inc. Issue 4. March 2016.

7. MIL-HDBK-217F Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment. Notice 2. December 1991.

8. Prytkov S.F. et al. [Reliability of electrical and radio products, 2002: a handbook. Moscow: FSUE 22 TsNII of the RF MoD; 2004. (in Russ.)

9. Nizhny Novgorod. Wikipedia. (accessed: 26.09.2025). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Nizhni_Novgorod.

Сведения об авторах

Леонид Романович Кириллов – аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского»; младший инженер по моделированию, ООО «Радио Гигабит». leonidkirillov000@gmail.com, Адрес: г. Нижний Новгород, ул. Салганская, д.24.

Юрий Иванович Лужавин – руководитель отдела моделирования физических процессов., ООО «Радио Гигабит». Бывший начальник отдела надежности АО «НПП«Полет». luzhavin@rambler.ru, Адрес: г. Нижний Новгород, ул. Салганская, д. 24.

About authors

Leonid Romanovich Kirillov – a postgraduate student, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod; junior modeling engineer, Radio Gigabit LLC. leonidkirillov000@gmail.com

Yuri Ivanovich Luzhavin – Head of the Department of modeling physical processes, Radio Gigabit LLC. Ex-head of the Reliability Department of Polyot JSC. luzhavin@rambler.ru

Вклад авторов в статью

Л.Р. Кириллов – разработка методики, проведение расчетов, оформление текста статьи.

Ю.И. Лужавин – постановка задачи, экспертная консультация, оформление текста статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Применение ансамблевого обучения для определения типа вторжения в IoT

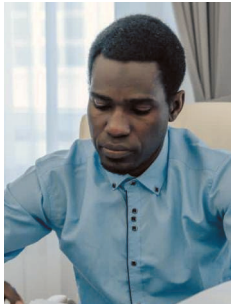
Using Ensemble Learning for Identifying the Type in IoT Intrusion

Нианг П.М.^{1*}, Сидоренко В.Г.¹
Niange P.M.^{1*}, Sidorenko V.G.¹

¹ РУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация

¹ Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

* malickdiarra30@gmail.com



Нианг П.М.



Сидоренко В.Г.

Резюме. Цель. Целью работы является повышение качества многоклассовой классификации для систем обнаружения вторжений (IDS) в среде Интернета вещей (IoT). Целью исследования является определение влияния предварительной фильтрации бинарного трафика и применения ансамблевых моделей на точность прогнозирования, особенно для меньшинства классов атак, с учетом вычислительных ограничений сред IoT. **Методы.** Были изучены три архитектурных подхода: прямая многоклассовая классификация, прямая многоклассовая классификация (включая класс «нормальный») и иерархическая архитектура, основанная на начальном бинарном обнаружении с последующей классификацией по типу атаки. Были оценены восемь алгоритмов машинного обучения, а также три ансамблевых метода (мягкого голосования (Soft Voting Classifier (SVC)), жесткого голосования (Hard Voting Classifier (HVC)) и Stacking Classifier (SC)). Эксперименты проводились на наборе данных UNSW-NB15 с использованием таких метрик, как Precision, Recall и F1-score. **Результаты.** Результаты показывают, что прямая классификация обеспечивает лучшее общее покрытие атак (средняя оценка F1-score до 63% для градиентного бустинга (GBC)), но может потребовать больших затрат времени на обучение (более 2000 секунд для GBC). Иерархическая бинарная фильтрация значительно сокращает время вычислений, но может снизить производительность на некоторых редких классах. Алгоритмы GBC, случайный лес (RF) и дополнительные деревья (ET) выделяются своей производительностью. Среди ансамблевых методов наилучшие результаты (оценка F1-score 73,87%) демонстрирует SC, превосходящий индивидуальные классификаторы, но при этом требует очень много времени на обучение. **Заключение.** Данное исследование показывает, что внедрение бинарной фильтрации является актуальной стратегией для снижения вычислительных затрат, но необходимо найти компромисс между производительностью, охватом и эффективностью. GBC остается наиболее эффективным методом для редких атак, но из-за своей стоимости плохо подходит для встраиваемых систем. ET и RF представляют собой отличный компромисс между точностью и скоростью. SC, хотя и наиболее эффективен, требует значительных ресурсов. Научная новизна исследования заключается в систематической оценке иерархических и ансамблевых подходов к IDS в Интернете вещей, что открывает путь к созданию более надежных архитектур, адаптированных к задачам кибербезопасности IoT.

Abstract. Aim. The aim of this work is to improve the quality of multi-class classification for Intrusion Detection Systems (IDS) in the Internet of Things (IoT) environment. The goal of the research is to determine the impact of preliminary binary traffic filtering and the application of ensemble models on prediction accuracy, especially for minority attack classes, taking into account the computational constraints of IoT environments. **Methods.** Three architectural approaches were studied: direct multi-class classification, direct multi-class classification (including the “normal” class), and a hierarchical architecture based on initial binary detection followed by classification by attack type. Eight machine learning algorithms, as well as three ensemble methods (Soft Voting Classifier (SVC), Hard Voting Classifier (HVC), and Stacking Classifier (SC)), were evaluated. Experiments were conducted on the UNSW-NB15 dataset using metrics such as Precision, Recall, and F1-score. **Results.** The results show that direct classification provides better overall attack coverage (average F1-score up to 63% for Gradient Boosting Classifier (GBC)), but may require longer training times (over 2000 seconds for GBC). Hierarchical binary filtering significantly reduces computation time but can decrease performance for some rare classes. The GBC, Random Forest (RF), and Extra Trees (ET) algorithms stand out for their performance. Among the ensemble methods, the Stacking Classifier (SC) demonstrates the best results (F1-score of 73.87%), surpassing individual classifiers, although it also requires substantial training time. **Conclusion.** This research shows that implementing

binary filtration is a relevant strategy for reducing computational costs, but a trade-off must be found between performance, coverage, and efficiency. GBC remains the most effective method for rare attacks but, due to its computational cost, is poorly suited for embedded systems. ET and RF represent an excellent compromise between accuracy and speed. SC, while the most effective, requires significant resources. The scientific novelty of the research lies in the systematic evaluation of hierarchical and ensemble approaches for IDS in IoT, paving the way for creating more robust architectures adapted to IoT cybersecurity tasks.

Ключевые слова: Интернет вещей, обнаружение вторжений, алгоритмы машинного обучения, многоклассовая классификация.

Keywords: Internet of Things, intrusion detection, machine learning algorithms, multi-class classification.

Для цитирования: Нианг П.М., Сидоренко В.Г. Применение ансамблевого обучения для определения типа вторжения в IoT // Надежность. 2026. №1 С. 49-61. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-49-61>

For citation: Niange, P.M., Sidorenko, V.G. Using Ensemble Learning for Identifying the Type in IoT Intrusion. *Dependability* 2026;1: 49-61. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-49-61>

Поступила: 23.10.2025 / **После доработки:** 06.11.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 23.10.2025 / **Revised on:** 06.11.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

Системы Интернета вещей (IoT) все чаще подвергаются сложным кибератакам из-за своей неоднородности, ограниченности ресурсов и постоянной связанности. Системы обнаружения вторжений (IDS) на основе машинного обучения (ML) в настоящее время становятся эффективным подходом для выявления аномального поведения в этих средах [1, 2]. Однако наборы данных, используемые для IDS, такие как UNSW-NB15, демонстрируют высокий дисбаланс с большинством нормальных образцов [3, 4]. Этот дисбаланс отрицательно влияет на производительность многоклассовых классификаторов, особенно при детальном распознавании различных типов атак.

После предыдущих работ по выбору соответствующих наборов данных [5] и оценке результатов применения различных алгоритмов ML для решения задач компьютерной безопасности в среде IoT с использованием бинарной [6] и многоклассовой классификации [7] и их объединения [8] настоящее исследование авторов фокусируется на механизме обнаружения атак, основанном на иерархической архитектуре.

Точность работы алгоритмов бинарной классификации превышает 95% [6], а у алгоритмов многоклассовой классификации точность не превышает 75% [7]. Объединение этих алгоритмов в очень редких случаях позволяет повысить точность обнаружения атаки [8].

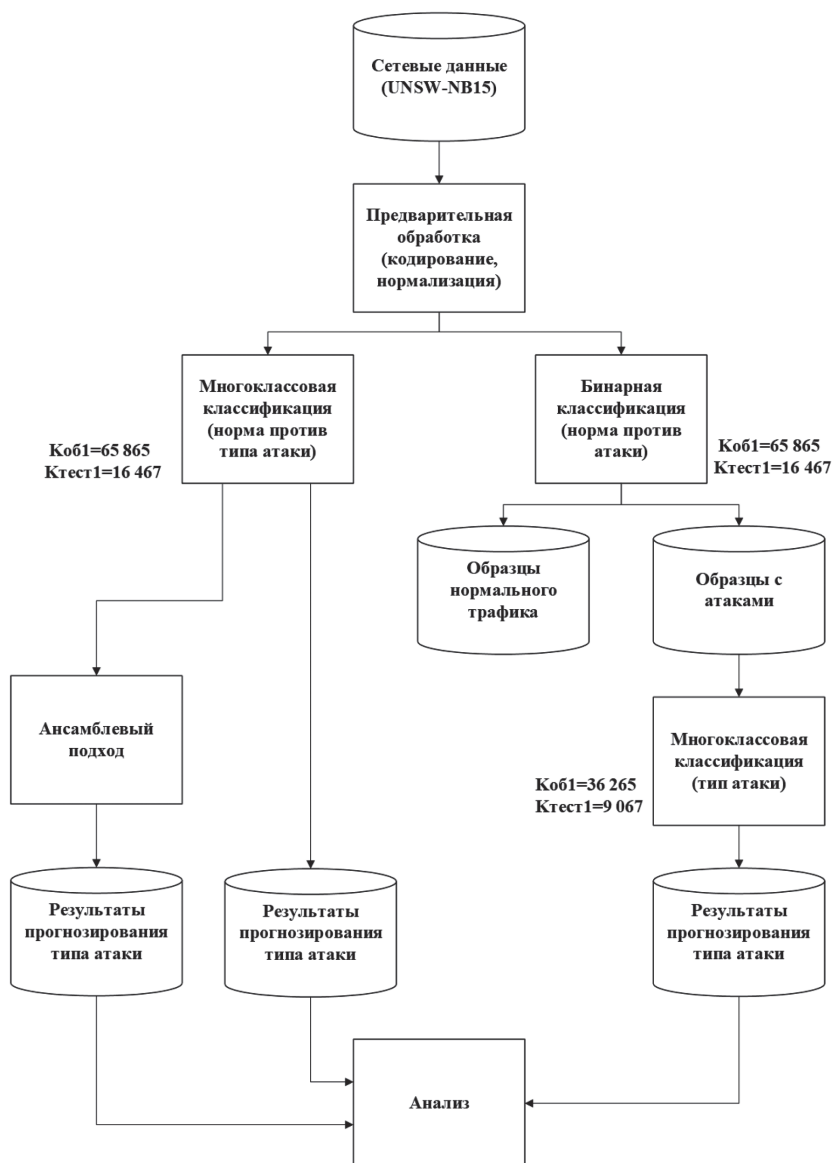


Рис. 1. План исследования

Цель этого исследования – найти путь повышения качества многоклассовой классификации для обнаружения вторжений в *IoT*, определив влияние предшествующей бинарной фильтрации и ансамбля моделей на точность прогнозирования, в частности для классов атак меньшинства, и выявив наиболее эффективные алгоритмы, принимая во внимание как производительность прогнозирования, так и вычислительные ограничения, характерные для сред *IoT*.

1. План исследования

Рис. 1 иллюстрирует ход проведенного исследования, в рамках которого были реализованы и оценены различные подходы:

- прямая многоклассовая классификация образцов (левая ветвь) с последующим ансамблевым подходом;
- прямая многоклассовая классификация (с «нормальным» классом) (центральная ветвь);
- иерархическая архитектура, основанная на первоначальном бинарном обнаружении с последующей классификацией типов атак, примененной к предположительно вредоносным образцам, выявленным в ходе бинарной классификации (без «нормального» класса) (правая ветвь).

В ходе исследования использована та же методология, что и в предыдущих работах [6-8], основанная на использовании библиотек языка программирования *Python* и среды *Python Jupyter Notebook*. Используются модели *ML*, сведения о качестве функционирования которых при решении задачи многоклассовой классификации уже имеются у авторов [7]:

- логистическая регрессия *Logistic Regression (LR)*;
- случайный лес *Random Forest (RF)*;
- *K*-ближайших соседей (*KNN*);
- наивное дерево Байеса *Naive Bayes (NB)*;
- дерево решений *Decision Tree (DT)*;
- дополнительные деревья *Extra Trees (ET)*;
- градиентный бустинг *Gradient Boosting Classifier (GBC)*;
- нейронная сеть прямого распространения, состоящей из полностью связанных нейронов с нелинейными функциями активации *MLP*.

В отличие от предыдущих работ рассмотрены ансамблевые методы обучения [9, 10]: голосование (*Voting*) [11] и двухуровневая стратегия ансамблевого обучения (*Stacking*) [12, 13], позволяющие объединять неоднородные модели, в отличие от бэггинга (*Bagging*) и бустинга (*Boosting*), которые, как правило, ограничены наборами однородных моделей [14]. В наших экспериментах использовались восемь перечисленных выше гетерогенных классификаторов в качестве базовых моделей и алгоритм *GBC* в качестве метаклассификатора из-за его хорошей производительности в качестве индивидуальной модели [9].

В ходе работы программы выполняются следующие шаги:

- подготовка данных;
- применение алгоритмов *ML*;
- определение значений метрик;
- оценка и сравнение качества исследуемых моделей.

Эксперименты проводились на наборе данных *UNSW-NB15*, который широко используется в литературе для оценки систем *IDS*, особенно в контексте *IoT*. Этот набор данных использовался авторами и ранее [3-8]. Извлеченные образцы охватывают следующие типы атак:

Фаззерс (*Fuzzers*) – попытка вызвать зависание программы или сети путем подачи на нее случайно сгенерированных данных;

Анализ (*Analysis*) – различные атаки порта, сканирование, проникновение спама и *html*-файлов;

Бэкдоры (*Backdoor*) – скрытый обход системы безопасности системы для получения доступа к компьютеру или его данным;

Дос (*Dos*) – злонамеренная попытка сделать сервер или сетевой ресурс недоступным для пользователей, обычно это временное прерывание или приостановка предоставления услуг хоста, подключенного к Интернету;

Эксплойты (*Exploits*) – использование злоумышленником знания о проблеме безопасности в операционной системе или части программного обеспечения при эксплуатации уязвимости;

Общий (*Generic*) – атаки криптоанализа;

Разведка (*Reconnaissance*) – атаки, направленные на сбор информации;

Шеллкод (*Shellcode*) – использование маленького фрагмента программного кода в качестве полезной нагрузки в эксплуатации его уязвимости;

Черви (*Worms*) – копирование злоумышленником самого себя для распространения на другие компьютеры, часто используется в компьютерной сети для распространения себя и получения доступа к целевому компьютеру, полагаясь на сбои в системе безопасности.

Исходными данными для построения оригинальной модели *ML* для *IDS* является набор данных *UNSW-NB15_training-set*. Обучающая выборка включает в себя $K_{об1}$, равное 65 865 записей для бинарной классификации и прямой многоклассовой классификации, и $K_{об2}$, равное 36 265 записей для многоклассовой классификации после бинарной фильтрации. Тестовая выборка включает в себя $K_{тест1}$, равное 16 467 записей для бинарной классификации и прямой многоклассовой классификации и $K_{тест2}$, равное 9 067 записей для многоклассовой классификации после бинарной фильтрации.

2. Анализ результатов прямого и иерархического подхода

В табл. 1 представлены результаты для различных методов *ML*, применяемых к бинарной классификации. Общая производительность многоклассовой классификации суммирована в табл. 2 для двух представленных на рис. 1 способов ее выполнения: независимо и после

Табл. 1. Сравнение значений метрик различных алгоритмов бинарной классификации [6], $K_{\text{тест1}} = 16\ 467$

	LR	KNN	RF	NB	DT	ET	GBC	MLP
<i>Precision</i> , %	93,02	95,19	97,69	79,53	97	98	96	96
<i>Recall</i> , %	92,98	95,11	97,68	76,84	97	98	96	96
<i>F1-score</i> , %	92,99	95,12	97,68	76,73	97	97	96	96
TN	6 922	7 146	7 256	6 611	7 207	7 262	7 119	7 153
FP	478	254	144	789	193	138	281	247
FN	678	551	238	3 025	365	278	327	353
TP	8 389	8 516	8 829	6 042	8 702	8 789	8 740	8 714
Тренировочное время, с	101,41	10,93	6,76	0,16	4,21	9,41	49,44	53,43
Время прогнозирования, с	0,00	16,74	0,19	0,04	0,01	0,21	0,05	0,02
Общее время, с	101,41	27,67	6,95	0,2	4,22	9,62	49,49	53,45
AUC	0,93	0,95	0,98	0,78	0,97	0,98	0,96	0,96

Precision – точность распознавания типа атак; *Recall* – доля правильно классифицированных объектов классов от числа всех объектов класса; *F1-score* – гармоническое значение *Precision* и *Recall*, *TN* – истинно-положительный результат; *FP* – ложно-положительный результат; *FN* – ложно-отрицательный результат; *TP* – истинно-отрицательный результат; *AUC* (площадь под кривой) – инструмент для оценки.

Табл. 2. Сравнение значений метрик рассмотренных алгоритмов многоклассовой классификации

Прямая многоклассовая классификация [7], $K_{\text{тест1}} = 16\ 467$								
	LR	KNN	RF	NB	DT	ET	GBC	MLP
<i>Precision</i> , %	59	53	66	45	60	64	75	69
<i>Recall</i> , %	43	47	59	43	59	58	60	50
<i>F1-score</i> , %	42	48	61	29	59	59	63	51
Тренировочное время, с	15,10	0,70	44,29	97	7,24	28,95	2016,89	85,26
Время прогнозирования, с	0,02	68,63	1,10	0,38	0,03	1,54	1,08	0,04
Общее время, с	15,12	69,33	45,39	1,35	7,27	30,49	2017,97	85,30
Многоклассовая классификация после бинарной фильтрации, $K_{\text{тест2}} = 9\ 067$								
<i>Precision</i> , %	43	38	69	28	73	57	73	0,04
<i>Recall</i> , %	39	31	51	21	59	49	55	0,09
<i>F1-score</i> , %	38	32	52	16	59	51	56	00
Тренировочное время, с	87,20	10,17	10,61	0,14	04,21	9,41	49,44	53,43
Время прогнозирования, с	0,00	16,74	0,19	0,04	0,01	0,21	0,05	0,02
Общее время, с	87,26	26,91	10,80	0,18	04,22	9,62	49,49	53,45

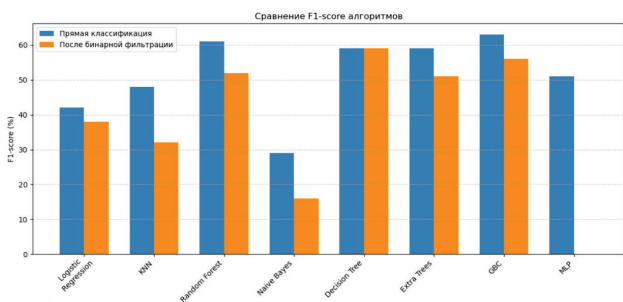


Рис. 2 Зависимость значений среднего *F1-score* от используемого алгоритма *ML*

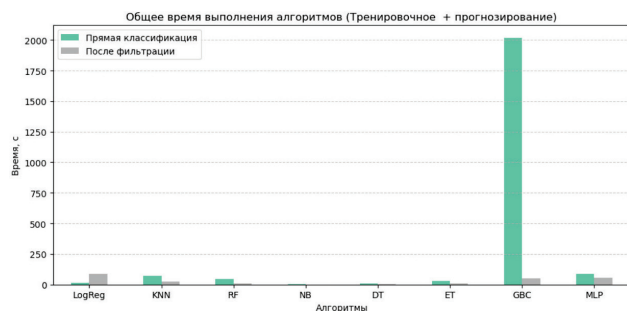


Рис. 3. Сравнение общего времени выполнения

бинарной. Матрицы ошибок, связанные с алгоритмами многоклассовой классификации, проиллюстрированы на рис. 2 и 3. Подробный анализ производительности в зависимости от типа атаки представлен в табл. 3–5. Рис. 4–6 дополняют и иллюстрируют эти результаты.

В случае прямой многоклассовой классификации алгоритмы *GBC*, *RF* и *ET* продемонстрировали превос-

ходную производительность со средними *F1-score* около 60% (Таблица 5). Однако эти показатели сопровождаются весьма изменчивым временем тренировки, в то время как *ET* и *RF* остаются относительно быстрыми, *GBC* требует значительно большего времени тренировки, которое может достигать нескольких тысяч секунд. Этот последний пункт может стать серьезным ограничением в средах *IoT*.

Табл. 3. Точность распознавания типа атак (*Precision*, %)

Прямая многоклассовая классификация [7], $K_{\text{тест1}} = 16\ 467$									
	LR	KNN	RF	NB	DT	ET	GBC	MLP	Среднее по всем методам
Analysis	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Backdoor	57	67	80	18	78	80	90	90	70
DoS	74	78	88	84	87	87	90	79	83,375
Exploits	43	29	39	45	37	39	43	38	39,125
Fuzzers	60	65	75	89	74	74	64	61	70,25
Generic	00	04	13	04	15	12	68	00	14,5
Normal	68	10	24	11	21	25	79	74	39
Reconnaissance	94	100	99	94	99	99	100	99	98
Shellcode	100	54	68	04	54	66	61	49	57
Worms	00	25	71	00	32	62	55	100	43,125
Многоклассовая классификация после бинарной фильтрации, $K_{\text{тест2}} = 9\ 067$									
Analysis	50	09	80	00	100	21	100	00	45
Backdoor	00	04	62	00	56	11	69	00	25,25
DoS	41	35	42	27	45	44	46	00	35
Exploits	62	46	64	79	76	64	69	34	61,75
Fuzzers	64	39	72	56	67	76	81	00	56,875
Generic	99	99	100	61	99	100	100	00	82,25
Reconnaissance	73	74	93	16	93	90	94	00	66,625
Shellcode	00	36	72	06	68	65	67	01	39,375
Worms	00	00	33	03	57	40	30	00	20,375

 Табл. 4. Доля найденных объектов классов от числа всех объектов класса (*Recall*, %)

Прямая многоклассовая классификация [7], $K_{\text{тест1}} = 16\ 467$									
	LR	KNN	RF	NB	DT	ET	GBC	MLP	Среднее по всем методам
Analysis	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Backdoor	65	56	77	12	77	75	76	70	63,5
DoS	71	73	89	14	86	89	85	85	74
Exploits	04	32	38	01	40	37	23	06	22,625
Fuzzers	84	67	79	16	72	79	87	91	73,125
Generic	00	07	14	64	16	12	17	00	16,25
Normal	08	15	21	23	21	21	17	14	17,5
Reconnaissance	96	98	98	87	98	98	98	97	96,25
Shellcode	01	19	61	99	53	49	56	27	45,625
Worms	00	00	16	16	28	16	38	06	15
Многоклассовая классификация после бинарной фильтрации, $K_{\text{тест2}} = 9\ 067$									
Analysis	01	06	06	00	05	06	06	02	04
Backdoor	00	02	04	00	07	02	07	00	2,75
DoS	24	34	39	01	62	46	61	00	33,375
Exploits	77	65	75	11	68	73	75	01	55,625
Fuzzers	80	30	81	13	86	78	81	00	61,125
Generic	96	96	97	97	97	97	98	00	84,75
Reconnaissance	74	39	80	51	81	81	81	00	61,625
Shellcode	00	05	64	02	53	42	61	73	37,5
Worms	00	00	09	18	73	18	27	00	18,125

После внедрения бинарной фильтрации наблюдается общее снижение *F1-score* для большинства алгоритмов из-за удаления нормального контекста, который помогает некоторым алгоритмам в различении классов. Однако этот шаг также позволяет уменьшить размер выборки, что приводит к значительному уменьшению времени

тренировки и прогнозирования для большинства алгоритмов. Таким образом, некоторые модели показывают лучший компромисс времени и производительности в этой конфигурации, что делает иерархическую классификацию привлекательной в рамках ограниченного развертывания.

Табл. 5. Гармоническое значение *Precision* и *Recall* (*F1-score*, %)

Прямая многоклассовая классификация [7], $K_{\text{recr1}} = 16\,467$									
	LR	KNN	RF	NB	DT	ET	GBC	MLP	Среднее по всем методам
Analysis	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Backdoor	61	61	79	14	77	77	82	79	66,25
DoS	72	75	89	24	87	88	87	82	75,5
Exploits	07	31	38	01	38	38	30	11	24,25
Fuzzers	70	66	77	27	73	76	74	73	67
Generic	00	05	14	08	15	12	27	00	10,125
Normal	15	12	23	15	21	23	29	23	20,125
Reconnaissance	95	99	99	90	98	99	99	98	97,125
Shellcode	01	28	64	08	53	56	58	35	37,875
Worms	00	06	26	00	30	25	44	12	17,875
Многоклассовая классификация после бинарной фильтрации, $K_{\text{recr2}} = 9\,067$									
Analysis	01	07	11	00	10	09	11	00	6,125
Backdoor	00	03	07	00	12	04	12	00	4,75
DoS	31	35	41	01	52	45	52	00	32,125
Exploits	69	54	69	19	72	68	72	02	56,875
Fuzzers	71	34	76	21	76	77	81	00	54,5
Generic	98	98	99	75	98	98	99	00	83,125
Reconnaissance	73	51	86	24	86	85	87	00	61,5
Shellcode	00	09	68	03	59	51	64	02	32
Worms	00	00	14	05	64	25	29	00	17,125

Табл. 6. Атаки обнаружены и классифицированы по типу

Прямая многоклассовая классификация, $K_{\text{recr1}} = 16\,467$									
	LR	KNN	RF	NB	DT	ET	GBC	MLP	
Analysis	-	131	101	1 418	8	98	23	11	
Backdoor	-	11	98	1 645	12	99	27	-	
DoS	894	795	713	32	1 078	690	933	812	
Exploits	1 912	2 483	2 461	1 222	2 513	2 489	2 034	2 348	
Fuzzers	1 320	1 209	1 220	228	1 006	1 231	1 591	1 392	
Generic	4 204	3 683	3 718	2 185	3 739	3 713	3 731	3 739	
Reconnaissance	695	676	638	296	592	652	609	670	
Shellcode	-	-	75	1 613	77	52	65	51	
Worms	-	-	1	386	-	1	19	2	
Всего обнаружено атак	9025	9021	9025	9025	9025	9025	9032	9025	
Многоклассовая классификация после бинарной фильтрации, $K_{\text{recr2}} = 9\,067$									
	LR	KNN	RF	NB	DT	ET	GBC	MLP	
Analysis	-	-	-	-	-	1	-	83	
Backdoor	278	-	-	-	-	-	3 002	167	
DoS	492	6 084	1 972	-	3 111	1 622	2 492	-	
Exploits	817	2 706	2 226	-	5 697	2 359	352	7 472	
Fuzzers	449	-	1 093	-	-	1 061	203	-	
Generic	3 685	-	3 667	6 783	-	3 685	-	-	
Reconnaissance	1 223	-	-	-	-	161	3	115	
Shellcode	1 944	-	-	-	-	1	-	974	
Worms	-	-	-	-	73	-	2 948	165	
Всего обнаружено атак	8 888	8 790	8 958	6 783	8 881	8 890	9 000	8 976	

Символ «-» указывает на то, что атака не была обнаружена соответствующим алгоритмом. Если атака обнаружена, указывается количество выявленных случаев.

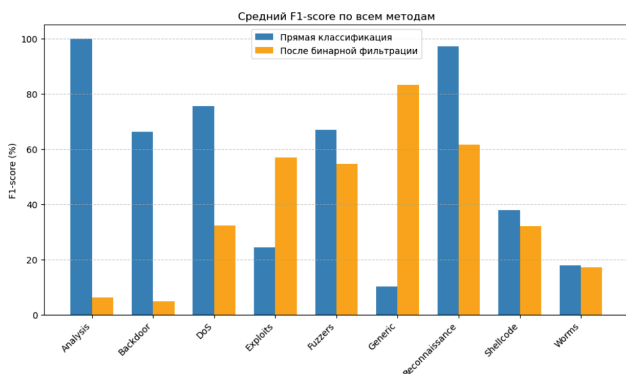


Рис. 4. Зависимость средних (по всем алгоритмам ML) значений *F1-score* от типа атаки

Подробный анализ по типу атаки, представленный на Рисунке 4, показывает, что для некоторых классов, таких как «Analysis» или «Backdoor», которые хорошо обнаруживаются при прямой классификации, после фильтрации возникает значительное снижение производительности. Напротив, для класса «Generic» наблюдается заметное улучшение, что говорит о том, что

снижение шума посредством бинарной фильтрации облегчает обнаружение определенных типов атак.

Подводя итог, можно сказать, что прямая классификация обеспечивает лучшее общее покрытие атак с выгодным компромиссом *F1-score*, но может быть ограничена значительным временем тренировки, особенно для некоторых алгоритмов, таких как *GBC*. Иерархическая классификация сокращает это время, сохраняя при этом хорошую производительность на основных классах, хотя иногда и за счет более малочисленных классов.

GBC достигает наилучших общих результатов *F1-score* (63% прямых, 56% отфильтрованных) и демонстрирует замечательную способность обнаруживать даже редкие классы. Однако это достигается ценой очень большого времени тренировки (более 2 000 секунд в прямой многоклассовой классификации). Для сравнения, *ET* является хорошим компромиссом: производительность близка к *GBC* (*F1-score* ≈ 59%), но с гораздо меньшим временем выполнения (30 секунд в реальном времени, 9 секунд после фильтрации).

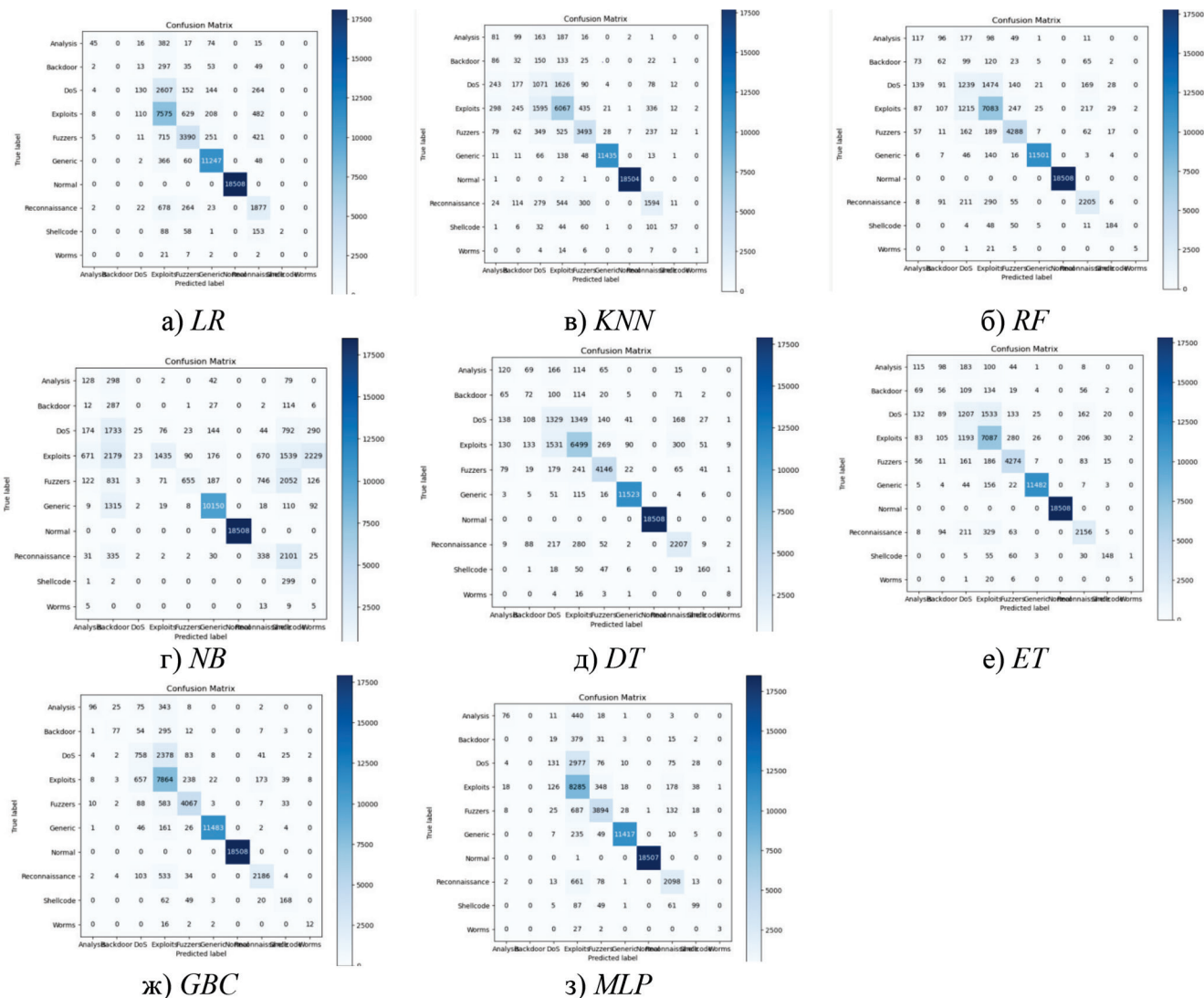


Рис. 5. Матрицы ошибок для рассмотренных алгоритмов (Прямая многоклассовая классификация) [7]

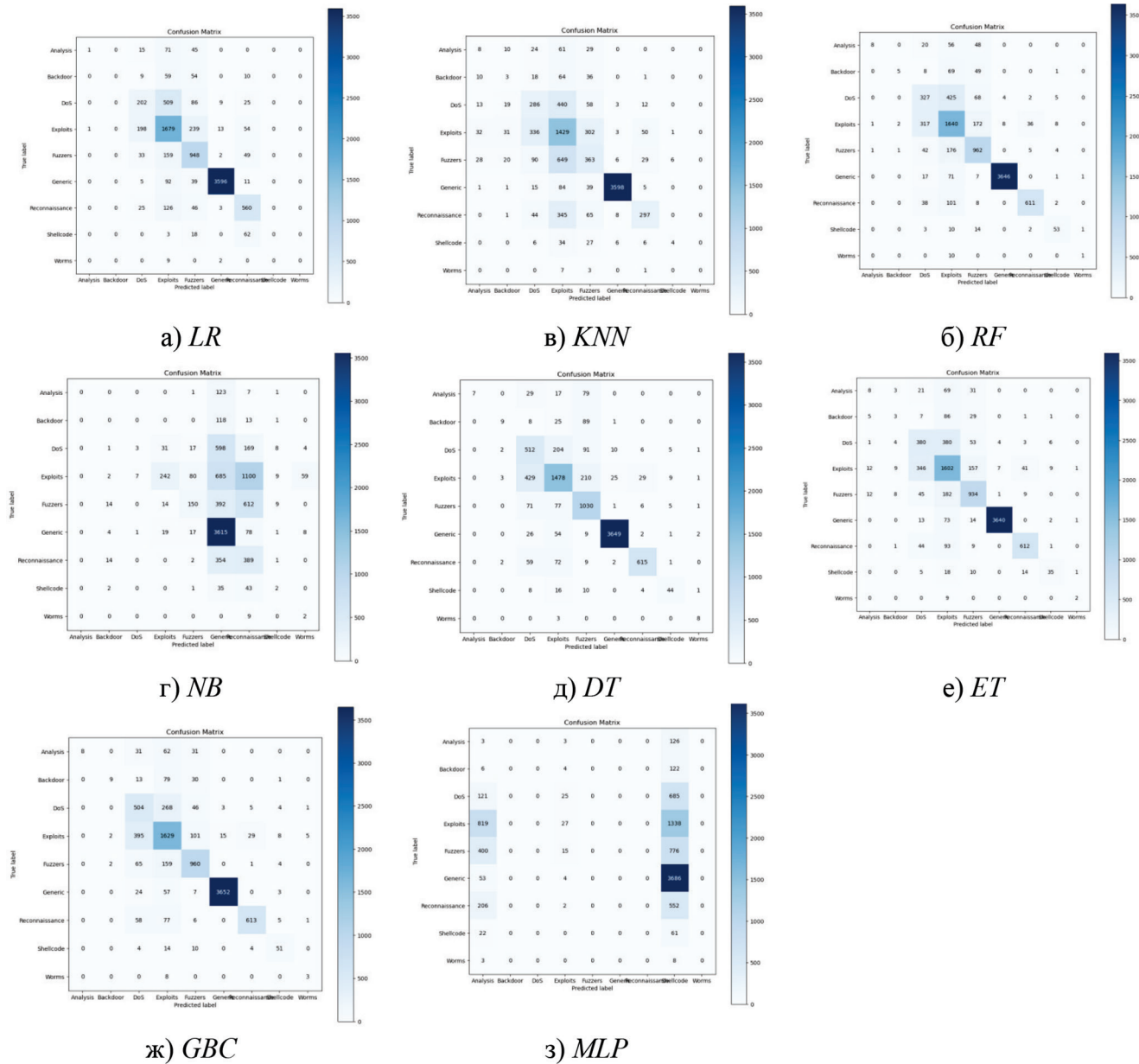


Рис. 6. Матрицы ошибок для рассмотренных алгоритмов (Многоклассовая классификация после бинарной фильтрации)

Наконец, алгоритмы *ET* и *RF* представляются рациональными решениями для использования в *IoT*, предлагая баланс между точностью, надежностью и скоростью выполнения как при прямой классификации, так и после бинарной фильтрации.

Табл. 6 показывает количество случаев, правильно обнаруженных и классифицированных по типу атаки. Она позволяет более подробно проанализировать способность алгоритмов распознавать различные типы вторжений. Рисунки 7–10 дополняют и иллюстрируют эти результаты.

В дополнение к количественному анализу *F1-score*, важно изучить способность различных алгоритмов эффективно обнаруживать и классифицировать различные типы атак, как показано в табл. 6 и на рис. 7–10. В табл. 6 суммировано количество при-

меров атак, правильно идентифицированных и отнесенных к своему типу каждым алгоритмом, с ограничением прямой многоклассовой классификации и классификации, выполненной после фазы бинарной фильтрации.

В прямой настройке многоклассовой классификации алгоритмы *RF*, *ET* и *GBC* обнаруживают большое количество атак в большинстве классов, подтверждая их надежность, уже отмеченную их общей производительностью *F1-score*. Например, *RF* и *ET* обнаруживают более 2 000 случаев в типах *Exploits* и *Fuzzers*, в то время как *GBC* также демонстрирует превосходное покрытие для таких классов, как *Generic*, с более чем 3 700 правильно классифицированными примерами. Напротив, такие модели, как *KNN* или *NB*, показывают более неравномерное обнаружение с заметными

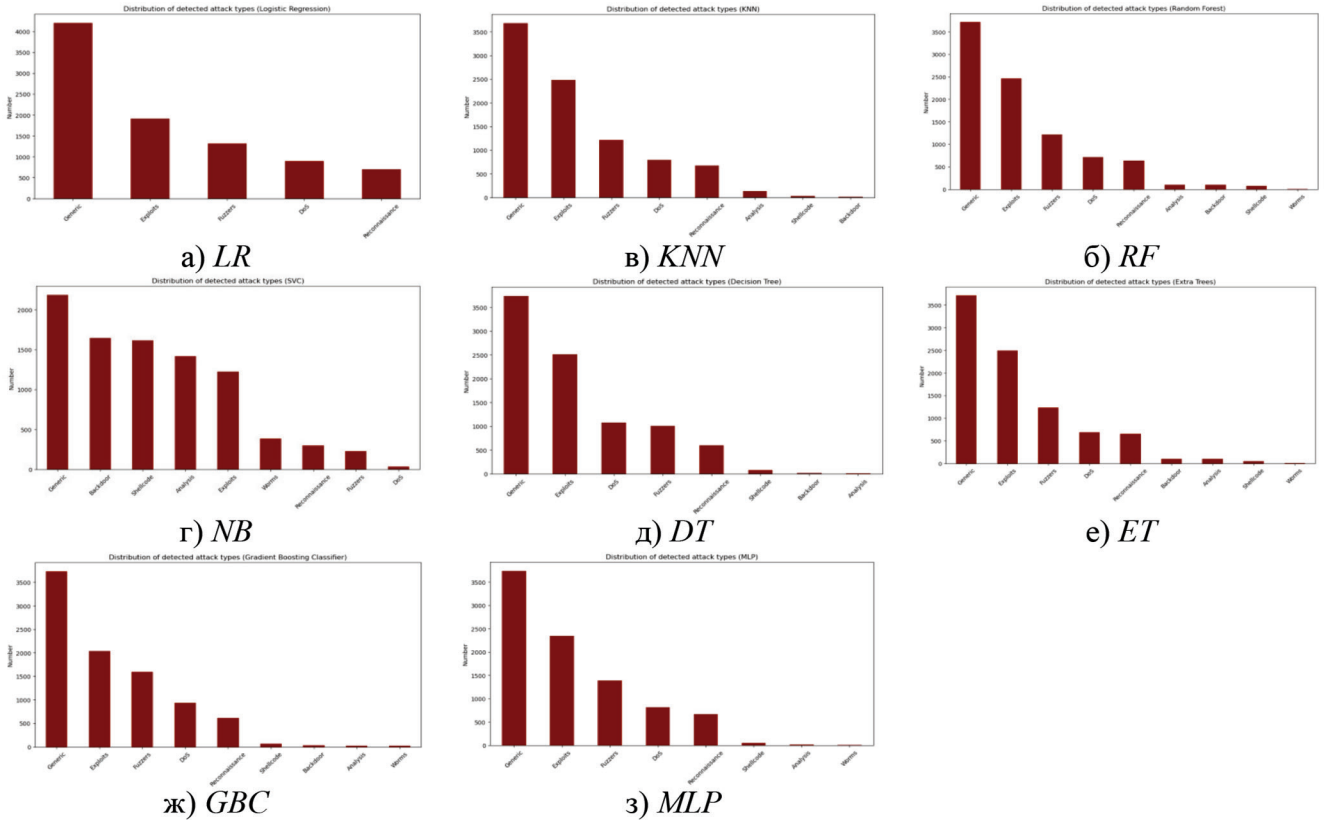


Рис. 7. Распределение типов атак, обнаруженных алгоритмами (прямая многоклассовая классификация)

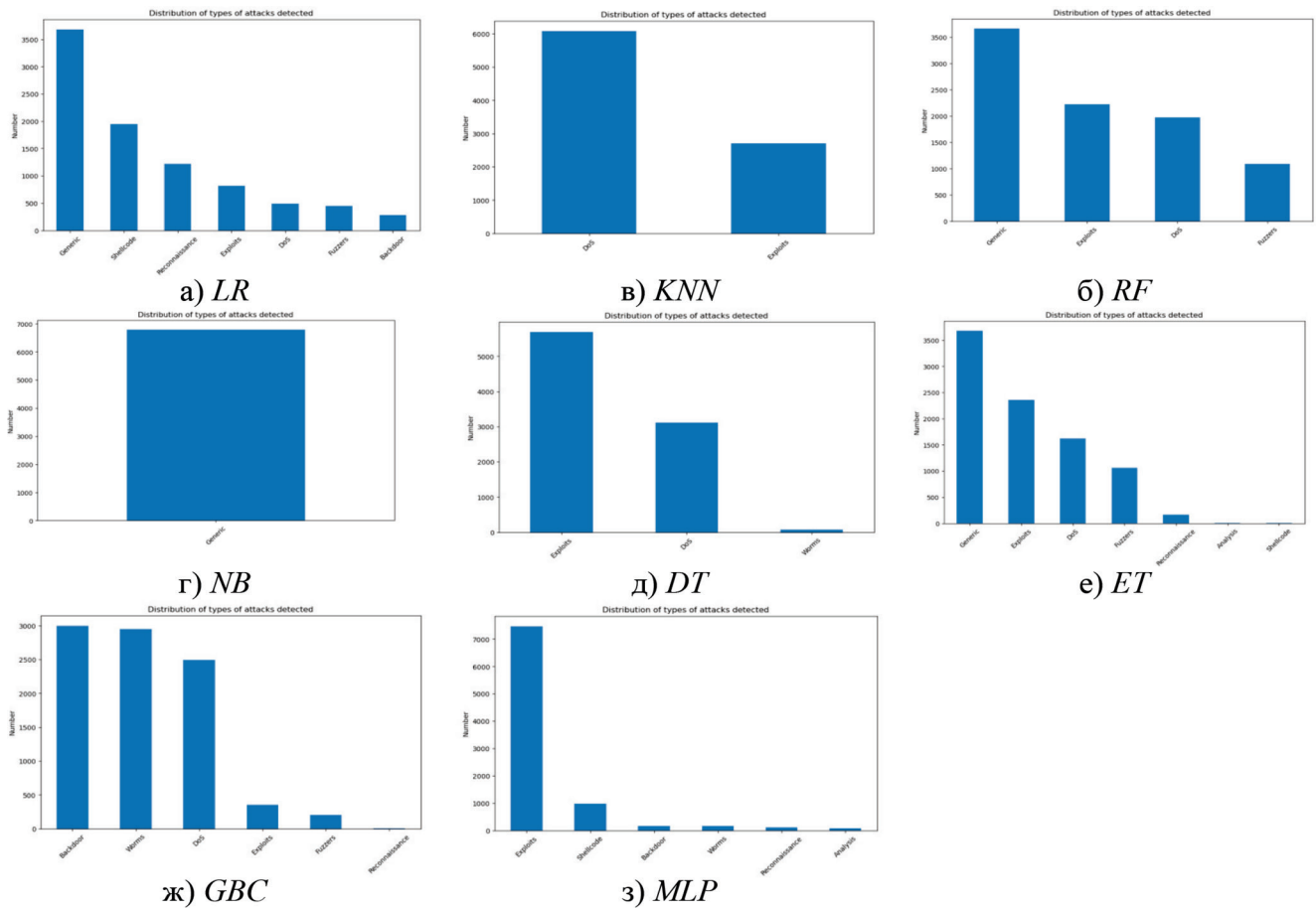


Рис. 8. Распределение типов атак, обнаруженных алгоритмами (многоклассовая классификация после бинарной фильтрации)

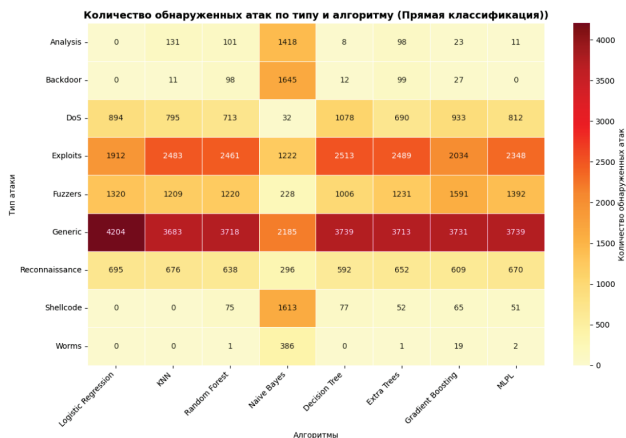


Рис. 9. Количество обнаруженных атак по типу и алгоритму (Прямая многоклассовая классификация)

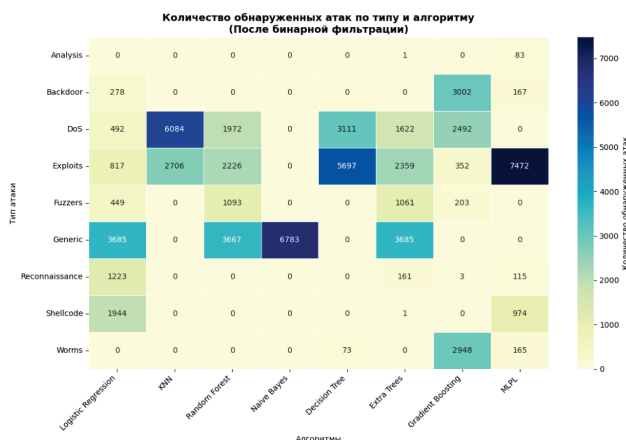


Рис. 10. Количество обнаруженных атак по типу и алгоритму (Многоклассовая классификация после бинарной фильтрации)

сбоями в некоторых редких или специфических классах, таких как *Shellcode* и *Worms*, что отражает их ограничения в распознавании менее представленных типов атак.

После применения бинарной фильтрации динамика обнаружения существенно меняется. Общее количество обнаруженных атак немного уменьшается в результате сокращения базы примеров для классификации, но некоторые модели, такие как *GBC* и *RF*, поддерживают высокий уровень обнаружения по ключевым классам. Например, *GBC* теперь обнаруживает более 3 000 случаев *Backdoor* и почти 2 500 случаев *DoS*, показывая, что бинарная фильтрация не ставит под угрозу его способность идентифицировать эти

критические атаки. *ET* также поддерживает хорошее покрытие по типам *Generic*, *Exploits* и *Fuzzers*. Однако некоторые алгоритмы, в частности, *LR* и *NB*, показывают, что количество обнаруженных атак резко падает, что отражает их большую зависимость от глобального контекста, включая обычный трафик. Аналогично, *KNN* теряет способность обнаруживать несколько классов после фильтрации, что иллюстрирует его ограничения в этой настройке.

Подводя итог, анализ Таблицы 6 подтверждает, что модели *GBC*, *RF* и *ET* сочетают в себе как хорошую производительность *F1-score*, так и эффективную способность обнаруживать широкий спектр атак, даже после уменьшения проблемы с помощью бинарной фильтрации. Это наблюдение подтверждает их роль в качестве предпочтительных решений для обнаружения вторжений в *IoT*, где разнообразие атак и вычислительные ограничения являются основными проблемами.

После бинарной фильтрации результаты многоклассовой классификации остаются посредственными. Однако в обоих подходах – прямой многоклассовой классификации и классификации после фильтрации – алгоритм *GBC* обеспечивает наилучшую производительность.

3. Анализ результатов ансамблевых подходов

В табл. 7 представлено подробное сравнение трех ансамблевых моделей (мягкого голосования (*Soft Voting Classifier (SVC)*), жесткого голосования (*Hard Voting Classifier (HVC)*) и *Stacking Classifier (SC)*) и высокопроизводительного индивидуального алгоритма *GBC*, применяемого для многоклассовой классификации. Рис. 11 и 12 иллюстрируют эти результаты.

Табл. 7 показывает, что *SC* обеспечивает наилучшую общую производительность с точностью 75,67%, полнотой 72,48% и *F1-score* 73,87%. Эта эффективность обусловлена его способностью оптимально комбинировать результаты нескольких классификаторов. Однако эта высокая производительность сопровождается значительными вычислительными затратами: время обучения составляет 8 208,05 с, а общее время выполнения – 8 231,01 с. Модели *SVC* и *HVC*, напротив, показывают более скромные результаты (*F1-score* ≈ 55,7%), но выигрывают от более короткого времени

Табл. 7. Сравнение значений метрик рассмотренных алгоритмов многоклассовой классификации, $K_{тест} = 16\ 467$

	GBC	Soft Voting	Hard Voting	Stacking
<i>Precision</i> , %	75	56,30	57,34	75,67
<i>Recall</i> , %	60	55,34	54,87	72,48
<i>F1-score</i> , %	63	55,72	55,78	73,87
Время обучения, с	2 016,89	1 288,25	1 007,75	8 208,05
Время прогнозирования, с	1,08	20,95	20,22	22,97
Общее время, с	2 017,97	1 309,20	1 027,98	8 231,01

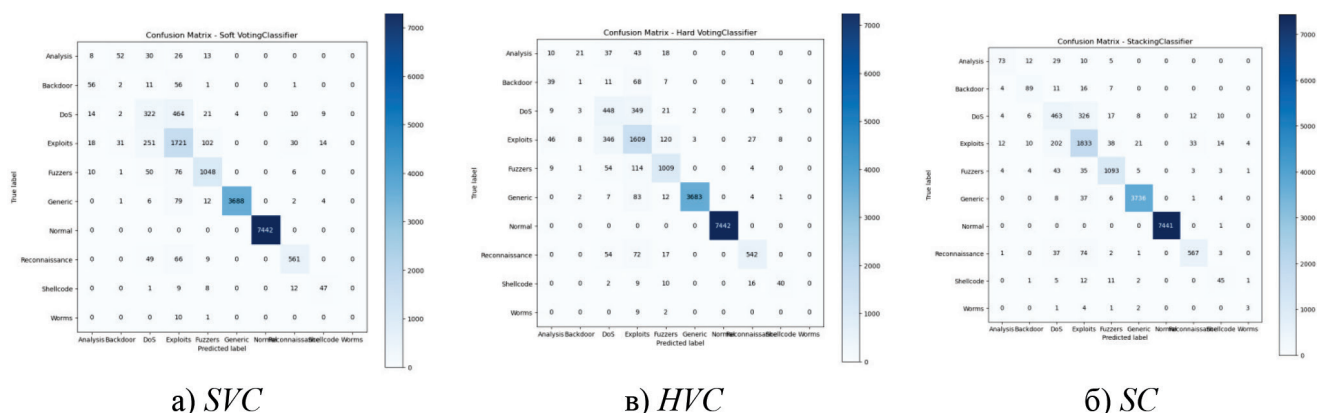


Рис. 12. Матрицы ошибок алгоритмов

обучения и прогнозирования, особенно для *HVC*. В свою очередь, *GBC*, хотя и является отдельной моделью, выделяется своей хорошей точностью (75%) и *F1-score*, более высокой, чем у подходов *Voting* (63%), демонстрируя при этом наименьшее время прогнозирования (1,08 с).

Рис. 11 и 12 завершают этот анализ, наглядно иллюстрируя преимущество модели *SC* с точки зрения качества классификации.

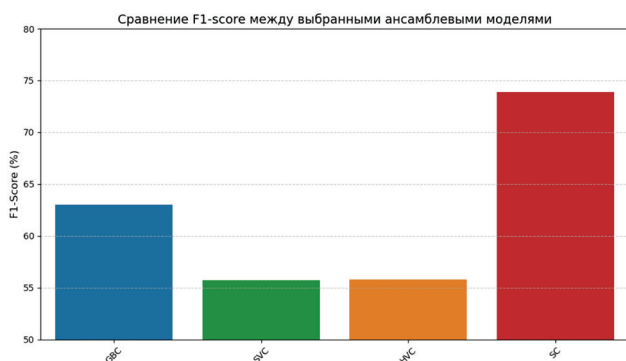


Рис. 11. Сравнение F1-score между алгоритмами

Подводя итог, можно сказать, что, хотя *SC* является наиболее эффективным, его применение следует оценивать с учетом временных ограничений и доступных ресурсов. Одновременно *GBC* представляет собой интересный компромисс между эффективностью и скоростью.

Заключение

Данное исследование показывает, что введение предварительной бинарной фильтрации является актуальной стратегией для улучшения специализации алгоритмов на определенных атаках, одновременно снижая вычислительные затраты. Однако эта фильтрация может поставить под угрозу обнаружение редких классов. Таким образом, необходимо найти компромисс между производительностью, покрытием и эффективностью по времени. *GBC* остается наиболее эффективным при редких атаках, но его ресурсоемкость делает его плохо

подходящим для встраиваемых систем. *ET* является отличным компромиссом между точностью и скоростью, в то время как *RF* надежен и стабилен в обеих конфигурациях. Эти три алгоритма оказываются наиболее подходящими для требований систем обнаружения вторжений в средах *IoT* из-за их способности эффективно обнаруживать широкий спектр атак, включая самые редкие.

Оценка трех ансамблевых методов (*HVC*, *SVC* и *SC*), сравнение их эффективности с лучшим индивидуальным классификатором (*GBC*) показывают, что *Stacking* превосходит все модели, включая *GBC*, демонстрируя заметное улучшение общего результата *F1-score*, обеспечивая при этом лучшее покрытие сложных классов. Таким образом, научная новизна выполненного исследования заключается в применении иерархического подхода к определению типа вторжения в *IoT*, который ранее для этого не использовался, а его практическая ценность заключается в том, что иерархический подход прокладывает путь для создания более надежных и экономически эффективных архитектур *IDS*, способных адаптироваться к конкретным проблемам кибербезопасности в *IoT*.

Благодарности

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02.

Список литературы

- Sadhu P.K., Yanambaka V.P., Abdelgawad A. Internet of things: Security and solutions survey // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 19. P. 7433. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/19/7433> (дата обращения: 06.01.2026). DOI: 10.3390/s22197433 EDN: ZFJPEH
- Janabi A.H., Kanakis T., Johnson M. Survey: Intrusion detection system in software-defined networking // IEEE Access. 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10746482/> (дата обращения: 06.01.2026). DOI: 10.1109/access.2024.3493384 EDN: JQSXDN

3. Moustafa N., Slay J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set). In : 2015 military communications and information systems conference (MilCIS). IEEE, 2015. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/MilCIS.2015.7348942

4. Lin W.C., Ke S.W., Tsai C.F. CANN: An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors // *Knowledge-based systems*. 2015. Vol. 78. Pp. 13-21. DOI: 10.1109/MilCIS.2015.7348942

5. Нианг П.М. Анализ наборов данных для исследования уязвимостей компьютерных сетей. // Труды III Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (30 мая 2024 г.). М.: Издательство Перо, 2024. С. 699-709. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-699-709 EDN: TTNUUB

6. Нианг П.М., Сидоренко В.Г. Выбор алгоритма машинного обучения для обнаружения вторжений в IoT. // *Надежность*. 2024. Т. 24. № 3. С. 44-51. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-3-44-51 EDN: HYJCRA

7. Malik N.P., Sidorenko V.G. Application of Multiclassification for Detecting Intrusions in IoT and Their Type Recognizing. In: 2024 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (QM&TIS&IT). IEEE, 2024. Pp. 78-83. DOI: 10.1109/QMTISIT63393.2024.10762926

8. Кулагин М.А., Логинова Л.Н., Сидоренко В.Г. и др. Формирование навыков использования алгоритмов машинного обучения у специалистов по информационной безопасности // *Информатизация образования и науки*. 2025. № 1(65). С. 56-65. URL: https://journal.ficto.ru/archive.html#journal_65 (дата обращения: 06.01.2026).

9. Ganaie M.A., Hu M., Malik A.K. et al. Ensemble deep learning: A review // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 115. P. 105151. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105151 EDN: OZQDBQ

10. Yang Y., Lv H., Chen N. A survey on ensemble learning under the era of deep learning. // *Artificial Intelligence Review*. 2023. Vol. 56. No 6. Pp. 5545-5589. DOI: 10.1007/s10462-022-10283-5 EDN: UNDPQU

11. Mienye I.D., Sun Y. A survey of ensemble learning: Concepts, algorithms, applications, and prospects // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 99129-99149. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3207287 EDN: YZJLXM

12. Rezk S.S., Selim K.S. Metaheuristic-based ensemble learning: an extensive review of methods and applications // *Neural Computing and Applications*. 2024. Vol. 36. No 29. Pp. 17931-17959. DOI: 10.1007/s00521-024-10203-4 EDN: IQOHYX

13. Zhang Y., Liu J., Shen W. A review of ensemble learning algorithms used in remote sensing applications // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No 17. P. 8654. DOI: 10.3390/app12178654 EDN: GVPHOT

14. Ahuja R., Sharma S.C. Stacking and voting ensemble methods fusion to evaluate instructor performance in higher

education // *International Journal of Information Technology*. 2021. Vol. 13. No 5. Pp. 1721-1731. DOI: 10.1007/s41870-021-00729-4 EDN: GLMTHI

References

1. Sadhu P.K., Yanambaka V.P., Abdelgawad A. Internet of things: Security and solutions survey. *Sensors* 2022;22(19):7433. (accessed 06.01.2026). Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/19/7433>. DOI: 10.3390/s22197433 EDN: ZFJPEH.

2. Janabi A.H., Kanakis T., Johnson M. Survey: Intrusion detection system in software-defined networking. *IEEE Access* 2024. (accessed: 06.01.2026). Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10746482/>. DOI: 10.1109/access.2024.3493384 EDN: JQSDXN.

3. Moustafa N., Slay J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set). In: 2015 military communications and information systems conference (MilCIS). IEEE; 2015. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/MilCIS.2015.7348942.

4. Lin W.C., Ke S.W., Tsai C.F. CANN: An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors. *Knowledge-based systems* 2015;78:13-21. DOI: 10.1109/MilCIS.2015.7348942.

5. Niang P.M. Analysis of data sets for the study of computer network vulnerabilities. In: Proceedings of the III International Science and Practice Conference Intelligent Transport Systems (May 30, 2024). Moscow: Pero Publishing; 2024. Pp. 699-709. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-699-709 EDN: TTNUUB. (in Russ.)

6. Niang P.M., Sidorenko V.G. Choosing the machine learning algorithm for detecting intrusions into IoT. *Dependability* 2024;24(3):44-51. (In Russ.) DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-3-44-51 EDN: HYJCRA.

7. Malik N.P., Sidorenko V.G. Application of Multiclassification for Detecting Intrusions in IoT and Their Type Recognizing. In: 2024 International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (QM&TIS&IT). IEEE; 2024. Pp. 78-83. DOI: 10.1109/QMTISIT63393.2024.10762926.

8. Kulagin M.A., Loginova L.N., Sidorenko V.G. et al. Formation of skills in using machine learning algorithms for information security specialists. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* 2025;1(65):56-65. (accessed: 06.01.2026). Available at: https://journal.ficto.ru/archive.html#journal_65. (in Russ.)

9. Ganaie M.A., Hu M., Malik A.K. et al. Ensemble deep learning: A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2022;115:105151. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105151 EDN: OZQDBQ.

10. Yang Y., Lv H., Chen N. A survey on ensemble learning under the era of deep learning. *Artificial Intelligence Review* 2023;56(6):5545-5589. (in Russ.) DOI: 10.1007/s10462-022-10283-5 EDN: UNDPQU.

11. Mienye I.D., Sun Y. A survey of ensemble learning: Concepts, algorithms, applications, and prospects. *IEEE Access* 2022;10:99129-99149. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3207287 EDN: YZJLXM.

12. Rezk S.S., Selim K.S. Metaheuristic-based ensemble learning: an extensive review of methods and applications. *Neural Computing and Applications* 2024;36(29):17931-17959. DOI: 10.1007/s00521-024-10203-4 EDN: IQOHYX.

13. Zhang Y., Liu J., Shen W. A review of ensemble learning algorithms used in remote sensing applications. *Applied Sciences* 2022;12(17):8654. DOI: 10.3390/app12178654 EDN: GVPHOT.

14. Ahuja R., Sharma S.C. Stacking and voting ensemble methods fusion to evaluate instructor performance in higher education. *International Journal of Information Technology* 2021;13(5):1721-1731. DOI: 10.1007/s41870-021-00729-4 EDN: GLMTHI.

Сведения об авторах

Папа Малик Нианг – аспирант РУТ (МИИТ), ул. Образцова, д.9, стр.9, Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: malickdiarra30@gmail.com

Валентина Геннадьевна Сидоренко – доктор технических наук; профессор; профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ), ул. Образцова, д.9, стр.9, Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: valenfalk@mail.ru

About the authors

Papa Malik Niange, Postgraduate student, Russian University of Transport (RUT MIIT), ul. Obraztsova 9, building 9, Moscow, Russian Federation, 127994, e-mail: malickdiarra30@gmail.com

Valentina G. Sidorenko, Doctor of Sciences (Engineering); Professor; Professor, Department of Control and Information Security, Russian University of Transport (RUT MIIT), ul. Obraztsova 9, building 9, Moscow, Russian Federation, 127994, e-mail: valenfalk@mail.ru

Вклад авторов в статью

П.М. Нианг. Проведение обзора литературы по теме исследования. Разработка методологии и архитектуры исследования, включая прямую многоклассовую классификацию и иерархический подход с бинарной фильтрацией. Реализация и параметризация алгоритмов машинного обучения и ансамблевых методов (*Voting, Stacking*). Проведение вычислительных экспериментов на наборе данных UNSW-NB15. Предварительная обработка и визуализация результатов.

В.Г. Сидоренко. Анализ полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Применение искусственного интеллекта для обеспечения надежности

The use of artificial intelligence for dependability assurance

Нетес В.А.^{1*}
Netes V.A.

¹ Московский технический университет связи и информатики, Российская Федерация, Москва

¹ Moscow Technical University of Communications and Informatics, Russian Federation, Moscow

* v.a.netes@mtuci.ru



Нетес В.А.

Резюме. Цель. Дать анализ современного состояния работ в России в области применения методов искусственного интеллекта для обеспечения надежности в технике, а также предложить новые перспективные направления исследований и разработок в этой области. **Методы.** Используются методы контекстного поиска информации, системного анализа и теории надежности. **Результаты.** Проведен обзор отечественных публикаций в рассматриваемой области, который показал возможность применения разнообразных методов искусственного интеллекта, в частности машинного обучения, для повышения надежности различных технических объектов. Выявлены две основные решаемые при этом задачи: выявление предотказных состояний с целью предотвращения возникновения отказов путем проведения предупредительного технического обслуживания или ремонта; быстрое обнаружение уже произошедших отказов и их локализация. Приведены примеры уже внедренных и работающих подобных решений. Проанализированы возможные пути преодоления нехватки исходных данных, требуемых для обучения, возникающей при малом числе отказов. Для более точного прогнозирования отказов предложено собирать и использовать не только параметры, характеризующие сам контролируемый объект, но и параметры окружающей среды, которые также могут влиять на состояние объекта. Показана целесообразность проведения обобщающих и систематизирующих исследований, результатом которых станут практические рекомендации, указывающие области предпочтительного применения тех или иных методов искусственного интеллекта. Указаны новые перспективные области применения искусственного интеллекта: выявление возможных общих причин в случаях возникновения множественных отказов, что будет способствовать сокращению времени восстановления, и проведение анализа коренных причин отказов с целью принятия мер по их устранению или уменьшению влияния в будущем. **Заключение.** Проведенный анализ и данные рекомендации будут способствовать межотраслевому обмену опытом, расширению и углублению работ по применению искусственного интеллекта для обеспечения надежности и приданию им большей практической направленности.

Abstract. The **Aim** of the paper is to analyse the state of the art of artificial intelligence application in Russia as regards technological dependability, as well as to propose new promising areas of research and development. **Methods.** The methods of contextual information search, system analysis, and dependability theory are used. **Results.** A review of domestic publications in the area of interest was conducted and showed the applicability of various artificial intelligence methods, in particular machine learning, to improve the dependability of various technological items. Two main tasks are identified to be solved: identification of prefailures in order to prevent failures by conducting preventive maintenance or repair; rapid detection of failures that have already occurred and their localisation. Examples of existing similar solutions are provided. The possible ways to overcome the absence of initial learning data associated with rare failures, are analysed. For more accurate prediction of failures, it is proposed to collect and use not only the parameters that characterise an examined item itself, but also environmental parameters that can also affect the condition of the item. The paper shows the relevance of studies aimed at generalised and systematic results to serve as guidelines for preferred application of certain artificial intelligence methods. New promising areas of artificial intelligence application are indicated, i.e., identifying possible common causes in cases of multiple failures, which will help reduce recovery time, and analysing the root causes of failures in order to take measures to eliminate them or reduce their future impact. **Conclusion.** The conducted analysis and the propose recommendations will contribute to the cross-industry exchange of experience, the expansion and deepening of work on the use of artificial intelligence for dependability assurance and make them more practical.

Ключевые слова: обеспечение надежности, искусственный интеллект, машинное обучение, прогнозирование отказов, техническая диагностика, мониторинг состояния.

Keywords: dependability assurance, artificial intelligence, machine learning, failure prediction, technical diagnostics, condition monitoring.

Для цитирования: Нетес В.А. Применение искусственного интеллекта для обеспечения надежности // Надежность. 2026. №1 С. 62-69. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-62-69>

For citation: Netes, V.A. The use of artificial intelligence for dependability assurance. Dependability 2026;1: 62-69. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-62-69>

Поступила: 26.09.2025 / **После доработки:** 10.12.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 26.09.2025 / **Revised on:** 10.12.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

Последние годы ознаменовались все более и более широким распространением разнообразных технологических решений с использованием искусственного интеллекта (ИИ). Несмотря на то, что многие принципиальные проблемы в этой области еще остаются открытыми (см., например, [1]), как сказано в Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года¹ (далее Стратегия), ИИ «является одной из самых важных технологий, которые доступны человеку в настоящее время» (п. 17.1).

Можно выделить две области взаимодействия ИИ с теорией надежности. Во-первых, это надежность самих систем ИИ. К сожалению, в Стратегии этот важный аспект не упомянут. Однако о необходимости обеспечения надежности систем ИИ указано в нескольких стандартах². Правда, трактовка надежности в этих стандартах порой отличается от общепринятой, т.е. закреплённой общетехническими стандартами системы «Надежность в технике» [2]. Несмотря на наличие ряда публикаций по этой важной тематике, она еще не получила должного развития. Здесь ждут своего решения такие принципиальные задачи, как выбор показателей надежности для систем ИИ, классификация отказов и определение критериев отказов для них, разработка методов прогнозирования и оценки их надежности и др.

Вторая область – применение ИИ для решения задач обеспечения надежности различных технических объектов. Именно этому посвящена данная статья. Вначале в ней рассмотрены имеющиеся в нашей стране результаты в этой области, описанные в публикациях. Конечно, данный в следующем разделе обзор далеко не полон, публикаций по этой теме гораздо больше. В него включены те из них, которые по мнению автора этой статьи представляют наибольший интерес, являются

типичными или предлагают новые полезные идеи, а также описывают уже внедренные в практику решения. Далее проведен анализ результатов, выявлены проблемные точки и указаны перспективные направления дальнейшего применения ИИ в надежности.

1. Обзор литературы

«Развитие информационных систем, помогающих человеку принимать решения, началось с появления в 1950-х годах экспертных систем, описывающих алгоритм действий по выбору решения в зависимости от конкретных условий» (Стратегия, п. 6). В [3] рассмотрено использование экспертных систем (ЭС), которые тогда составляли большую часть систем ИИ, для диагностирования и поиска неисправностей. Отмечено, что для этих задач создание централизованной ЭС может быть неоправдано, более подходящей может быть ЭС, распределенная по всей системе как можно ближе к оборудованию. В такой системе управление и диагностика оборудования выполняются в реальном времени на встроенных вычислительных средствах (например, программируемых логических контроллерах), а не на выделенной рабочей станции. Для проверки был создан работающий прототип встроенной динамической ЭС диагностики. Результаты позволили сделать вывод, что такой подход позволит организовать оперативное управление на основе экспертных данных, что существенно повысит надежность сложных и ответственных систем.

Действительно, спустя несколько лет начали применяться системы мониторинга технического состояния и диагностики оборудования на основе ИИ. В [4] описан опыт внедрения в 2015–2016 гг. на Павлодарском нефтехимическом заводе (Казахстан) системы КОМПАКС® (разработчик НПЦ «Динамика», Россия), включающей автоматическую ЭС выявления дефектов и неисправностей оборудования в реальном времени. Она позволила предотвращать аварии, пожары и простои технологического комплекса из-за отказов и многократно снизить затраты на ремонт оборудования.

Следующим шагом в развитии ИИ стало применение машинного обучения (МО), «благодаря которому информационные системы самостоятельно формируют правила и находят решение на основе анализа зависимостей, используя исходные наборы данных (без предва-

¹ Утверждена Указом Президента РФ от 10.10.2019 № 490, изменения и дополнения внесены Указом Президента РФ от 15.02.2024 № 124

² ГОСТ Р 59276–2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения; ГОСТ Р 59898–2021. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения; ГОСТ Р 71476–2024 (ИСО/МЭК 22989:2022). Искусственный интеллект. Концепции и терминология искусственного интеллекта.

рительного составления человеком перечня возможных решений» (Стратегия, п. 6). Выделяют классические методы МО (метод главных компонент, решающие деревья, случайный лес, метод опорных векторов и др.) и методы глубокого МО на основе искусственных нейронных сетей (ИНС).

В [5] проанализировано применение методов МО для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути. Учитывая огромные объемы данных о параметрах пути, задача выявления опасных возможных событий не решается традиционными методами. На основании статистики, собранной на Куйбышевской железной дороге в 2014-2019 гг., проведено сравнение нескольких классических методов машинного обучения, лучшим из которых оказался алгоритм решающих деревьев. Разработанный комплекс математических моделей и методов предлагается адаптировать для работы в режиме реального времени и интегрировать с автоматизированной измерительной системой на базе транспортного средства.

Подобные же задачи ставились и в ряде других работ применительно к различным техническим объектам. В [6] проведен сравнительный анализ методов МО для определения предотказных и аварийных состояний авиадвигателей. Рассмотрены как классические методы, так и сверточные ИНС. В качестве исходных данных использованы наборы NASA, в основе которых показания датчиков, отражающих жизненные циклы работы двигателей. В [7] для прогнозирования отказов сложных систем предложена гибридная модель на основе сверточных ИНС, используемых для извлечения пространственных свойств из многомерных сенсорных данных, и сетей долгой краткосрочной памяти (long short-term memory, LSTM), используемых для моделирования долговременных зависимостей. Модель имеет два выхода: первый оценивает деградацию оборудования и предсказывает отказы, второй – остаточный ресурс оборудования. Вычислительные эксперименты, для которых тоже использовался набор данных NASA для газотурбинных авиадвигателей, показали эффективность предложенного решения.

В [8] рассмотрено прогнозирование неисправностей оборудования на основе анализа показаний различных датчиков. Описаны эксперименты, выполненные для станка с ЧПУ с использованием разных алгоритмов МО. Проанализированы параметры, влияющие на состояние станка, отмечена перспективность использования рекуррентных ИНС. Задача прогнозирования отказов насосной станции на основе временных рядов данных, полученных от датчиков, решалась в [9] с использованием алгоритмов МО без учителя. Было проведено сравнение нескольких таких алгоритмов и отмечено, что при их выборе необходимо учитывать частоту ложных тревог, а также находить компромисс между точностью классификации и длительностью интервала времени между определением аномалии и возникновением неисправности. Возможности применения ИИ для

повышения надежности нефтегазового оборудования обсуждаются в [10]. Указаны два основных направления: прогнозирование отказов и предупреждение о потенциальных проблемных ситуациях; оптимизация проведения профилактического технического обслуживания и плано-предупредительных ремонтов.

Обстоятельное описание интересного исследования дано в препринте [11]. В нем решалась задача оценки и прогнозирования показателей надежности городской водопроводной сети: интенсивности отказов, вероятности безотказной работы и коэффициента готовности. Был взят реальный пример водопроводной сети среднего российского города Камышлова (Свердловская обл.). В качестве входных параметров участков водопровода были взяты: материал, диаметр, длина и толщина стенки трубы, скорость коррозии, время эксплуатации, абсолютная высота, глубина залегания и количество отказов за 5 лет. Для прогнозирования надежности использовались ИНС, которые моделировались в программной среде Statistica 10.0 с помощью специализированного пакета SANN (STATISTICA Automated Neural Networks). Применение полученных результатов позволит выявлять трубопроводы с наибольшим риском аварий, оптимизировать планирование плано-предупредительного ремонта.

В [12] предложено включать в состав сложных систем ответственного назначения, в частности космических систем, средства управления техническим состоянием, в первую очередь, диагностирования отказов и прогнозирования предотказных состояний. Их основу должны составлять сенсорные поля, предназначенные для сбора и обработки значений диагностических параметров. Таким образом, практически в режиме реального времени будут собираться данные, обработка которых позволит оценивать состояние системы. Отмечено, что перспективным направлением развития систем диагностирования состояния сложных объектов является включение в них модулей предиктивной аналитики и проактивного управления на основе ИИ. Для них предлагается использовать рекуррентные ИНС типа LSTM, позволяющие получать прогнозы для диагностических признаков с достаточно высокой точностью.

Результаты сравнительного анализа алгоритмов МО для прогнозирования отказов в механических системах представлены в [13]. Авторы справедливо отмечают, что разнообразие алгоритмов требует изучения их эффективности и применимости к различным задачам. Кратко описана методика такого изучения, в соответствии с которой были проанализированы несколько алгоритмов: логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг и глубокие ИНС. Для анализа были взяты данные о работе механических систем, содержащие более 10 000 записей с параметрами эксплуатации и информацией о предыдущих отказах. Наилучшие результаты по точности и полноте дали ИНС, которые, правда, имели наибольшие временные затраты: 90 с на обучение и 1 с на предсказание.

В [14] описана разработка системы диагностики отказов в реальном времени. Она должна была быть легковесной, обучаемой и интегрируемой в существующую АСУ. В ее составе: подсистема сбора данных с установленными на контролируемом объекте датчиками (температуры, давления, вибрации, тока и др.); модуль предварительной обработки данных, осуществляющий нормализацию сигналов, удаление шумов и формирование признаков; диагностический модуль на основе глубокой сверточной ИНС; модуль визуализации и принятия решений. Система была протестирована на пилотном участке водоочистой станции, где в реальных условиях вводились тестовые отказные ситуации: кратковременные колебания напряжения, утечка давления, повышенный шум, вибрация. Она показала высокую точность обнаружения отказов (более 96 %), быстроту реакции (до 2 с), низкую вероятность ложной тревоги (менее 2 %), возможность самообучения на новых данных. Отмечены и ограничения: необходимость достаточного объема обучающих данных и переобучения при изменении условий эксплуатации, для интерпретации решений нужны дополнительные модули объяснимости.

Задача обнаружения аварийных ситуаций на химических и нефтеперерабатывающих предприятиях рассмотрена в [15]. Это необходимо для создания системы поддержки принятия решений, помогающей оператору своевременно выявлять отказы оборудования. Предложено для обучения ИНС брать данные не с реального объекта, которых недостаточно, а с модели, соответствующей конкретному технологическому участку. В ряде предыдущих работ для получения исходных данных уже предлагалось использовать специальные системы моделирования или цифровые двойники. Однако их создание – также непростая задача. Поэтому в этой работе для моделирования типовых аварий предложено использовать промышленный компьютерный тренажер на платформе RTsim, предназначенный для обучения операторов. Была выбрана структура ИНС с двумя скрытыми слоями, распознающая три вида отказов. В дальнейшем предполагается обучить ИНС распознавать большее число типов отказов, а в перспективе – не только одиночные, но множественные и зависимые отказы.

Другой путь преодоления нехватки реальных данных об отказах для обучения модели прогнозирования отказов описан в [16]. Предложено осуществлять обучение на данных, соответствующих нормальному режиму функционирования контролируемого объекта, т.е. модель учится выявлять не аномалии в работе, а норму. Если значения контролируемых параметров отличаются от нормальных, фиксируется аномальное поведение и выдается сигнал о возможном отказе. Рассмотрен пример прогнозирования отказов электродвигателя по данным датчиков, измеряющих значения силы тока двигателя и осевых смещений вала и двигателя. В качестве алгоритма МО использовался случайный лес. Были построены модели для трех указанных параметров,

каждая из которых представляет собой 100 бинарных деревьев решений.

Еще один способ преодолеть нехватку данных для обучения описан в [17]. Неисправности выявляются путем анализа звуков, издаваемых механизмами в работе, с использованием сверточной ИНС. Из-за отсутствия достаточных данных для обучающей выборки неисправности имитировались искусственно. Как пример рассмотрен вентилятор. Описаны процедуры преобразования форматов аудиофайлов, визуализация данных с помощью спектрограмм, увеличение размера и качества наборов данных, архитектура ИНС.

В [18] дан интересный обзор и анализ опыта прогнозирования отказов установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) методами МО, при подготовке которого рассмотрено более 150 работ. Актуальность темы обусловлена тем, что способ скважинной добычи нефти с использованием УЭЦН является в России основным. Однако их недостатками являются сложность конструкции и невозможность проведения ремонтно-восстановительных работ без спуско-подъемных операций. Своевременная диагностика аномальных состояний УЭЦН позволит повысить их среднюю наработку на отказ, снизить эксплуатационные затраты и потери в добыче нефти из-за простоев. Отмечено, что работы по применению ИИ, в частности МО, для оценки надежности и прогнозирования отказов УЭЦН ведутся более 20 лет. Однако пока они в основном были исследовательскими и практически не содержали опыта внедрения. Единый подход к применению МО для прогнозирования отказов УЭЦН еще не выработан. Отмечена перспективность создания гибридных моделей на основе нескольких методов МО, использующих не только промышленные данные, но и данные вычислительных экспериментов. Указаны две основные проблемы: недостаточное количество исходных данных, их неполнота и разрозненность; применение принципиально разных метрик при оценке качества результатов прогнозирования отказов, что затрудняет интерпретацию и сравнение полученных результатов.

В то же время есть компании, где методы МО уже нашли практическое применение. Для автоматического поиска, классификации и определения параметров дефектов на трубопроводах в ПАО «Транснефть» в 2022 г. введена в промышленную эксплуатацию информационно-аналитическая система «Нейропоиск» на основе ИНС¹. ПАО «ВымпелКом» (бренд «Билайн») с 2023 г. применяет технологию «Виртуальный эксперт»². Он контролирует более 30 параметров более чем 150 тысяч базовых станций по всей России, что помогает предотвращать возможные перебои мобильной связи.

¹ URL: <http://szap.gosnadzor.ru/about/publicnyie-meropriyatiya/grafik-obsuzhdeniy-2024/28.02.2024/Презентация%20О%20применении%20ИИ%20для%20выявления%20дефектов%20на%20объектах%20ПАО%20«Транснефть».pdf>

² URL: <https://www.corp-beeline.ru/news/tehnologiya-virtualnyj-ekspert-na-osnove-ii-pomogla-v-3-raza-povysit-s>

Это позволило за год уменьшить число инцидентов в три раза. К сожалению, более подробную информацию об этих разработках найти не удалось.

2. Анализ имеющихся результатов и возможности их развития

Предыдущий раздел показывает, что исследования по применению ИИ для обеспечения надежности ведутся во многих отраслях применительно к самым разным объектам. Методы ИИ при этом также разнообразны, в последние годы, как правило, используется МО. Однако случаев практического применения пока немного. Это можно объяснить тем, что готовых «коробочных» продуктов здесь пока нет, а разработку решений «под себя» могут позволить себе только крупные компании, в которых масштаб применения окупит затраты. Для создания готовых продуктов нужны обобщающие и систематизирующие исследования, результаты которых позволили бы установить, что для таких-то объектов рекомендуются такие-то методы ИИ, для которых нужны такие-то исходные данные. Однако подобных результатов еще нет.

Круг задач, решаемых ИИ, пока не слишком широк. По сути, здесь можно выделить две задачи: 1) выявление предотказных состояний с целью недопущения возникновения отказов путем проведения предупредительного технического обслуживания или ремонта; 2) быстрое обнаружение уже происшедших отказов и их локализация. Первая направлена на улучшение безотказности, вторая – ремонтпригодности.

Во многих объектах отказы возникают редко, что, конечно, хорошо. Однако это может приводить к нехватке данных для обучения ИИ. Здесь также более выгодное положение у крупных компаний, имеющих большие парки однотипного оборудования (например, «ВымпелКом» с более чем 150 тысячами базовых станций). Предложены три пути решения этой проблемы. Во-первых, можно собирать статистику не с реальных объектов, а с их компьютерных моделей. Это перспективное направление, учитывая растущую популярность цифровых двойников. Однако для прогнозирования отказов используются не только параметры, характеризующие способность объекта выполнять требуемые функции, которым уделяют внимание в моделях, но и такие признаки, как повышение температуры, чрезмерная вибрация, посторонние шумы и т.п., а они вряд ли будут воспроизводиться в модели. Во-вторых, можно искусственно вносить неисправности в реальные объекты. Однако нельзя специально создавать ситуации, которые могут привести к разрушению объекта, возгоранию, утечке агрессивных веществ и т.п., а наиболее важно прогнозировать именно такие критические отказы. Третий путь – обучение ИИ тому, что есть нормальное состояние объекта. Тогда всякое отклонение от него будет рассматриваться как аномалия и сигнал о возможном отказе. Этот подход может оказаться перспективным, однако нуждается в дальнейших исследованиях.

Как уже отмечено, в разных работах использованы различные показатели, характеризующие эффективность решения задач прогнозирования и диагностики отказов. Кроме того, горизонт прогнозирования также различается. Все это весьма затрудняет сравнение результатов, полученных разными авторами.

Изменение условий эксплуатации требует переобучение модели прогнозирования отказов. Важно понимать, насколько велики должны быть изменения, чтобы требовалось переобучение. Если это будет происходить часто, то применение МО может оказаться неоправданным. Поэтому данный вопрос требует серьезного изучения. Он связан с устойчивостью процессов, ведущих к отказам, и наличием информативных признаков для прогноза [19, § 7.1]. В этой связи можно предложить собирать и использовать для прогнозирования отказов не только параметры, характеризующие сам объект, но и параметры окружающей среды, также влияющие на надежность. Они могут относиться к погодным условиям, внешней электромагнитной обстановке и т.п. Представляется, что их использование может повысить точность прогноза, и этот вопрос также заслуживает изучения.

3. Анализ причин отказов

При возникновении отказов нужно не только быстро их обнаружить и локализовать. Для ускорения восстановления в некоторых случаях нужен их более глубокий анализ. Это важно, в частности, в случае отказов по общей причине для выявления этой причины. Например, в сети связи обрыв одного кабеля может вызвать отказы большого числа каналов, что ведет к появлению многочисленных аварийных сообщений в системе мониторинга неисправностей, для которых важно быстро выявить общую первопричину. Поэтому в сетях связи выделяют группы ресурсов общего риска, а в системах мониторинга используется функция корреляции аварийных сообщений [20]. Для автоматизированных систем управления и мониторинга сетей электросвязи, реализующих функции мониторинга неисправностей, обеспечение корреляции аварийных сообщений является обязательным¹. Такой анализ отказов будет полезен при мониторинге и других технических объектов, в которых возможны отказы по общей причине. Для реализации этой функции перспективным является использование методов МО [20].

Подобные процедуры подчас называют анализом первопричин или коренных причин (Root Cause Analysis, RCA), что соответствует буквальному смыслу этих слов. Однако в международных стандартах RCA определяется иначе – как процесс, включающий не только выявление

¹ Правила применения оборудования автоматизированных систем управления и мониторинга сетей электросвязи. Часть I. Утв. приказом Мининформсвязи РФ от 15.05.2007 № 55; Часть II. Утв. приказом Мининформсвязи РФ от 19.06.2007 № 68; Часть III. Утв. приказом Минкомсвязи от 12.01.2009 № 2.

первопричин отказов, но и выработку предложений, направленных на их устранение или уменьшение влияния¹. Таким образом, корреляция аварийных сообщений относится к реактивным методам, так как направлена на решение текущей задачи – выявить первопричину уже случившихся отказов, чтобы ускорить восстановление; а RCA является проактивным методом [21], который нацелен на будущее, его конечная цель – предотвратить еще не случившиеся отказы или снизить негативный эффект от них.

Для проведения RCA формируют группу экспертов, которые используют такие методы, как «5 почему», анализ видов и последствий отказов, анализ дерева неисправностей, диаграмма Исикавы, анализ Парето. Это самый интеллектуальный вид деятельности из всех рассмотренных в данной статье. Представляется, что для RCA также можно будет использовать ИИ. При этом здесь не требуется быстрой реакции, анализ может выполняться в течение достаточно длительного времени. Поэтому целесообразно, чтобы система ИИ для RCA была не автоматической, а автоматизированной, т.е. работала с экспертами в интерактивном режиме: предлагала людям какие-то варианты, а потом вносила коррективы в свои предложения в соответствии с их замечаниями и соображениями.

Заключение

Применение ИИ для обеспечения надежности технических объектов является весьма перспективным. Однако, несмотря на многочисленные исследования в этой области, внедренных решений пока немного. Основные задачи, решаемые с использованием ИИ: выявление предотказных состояний, обнаружение и локализация отказов. Имеющие решения являются достаточно узкими, т.е. применимы к конкретным объектам. Кроме того, возникают вопросы о том, насколько имеющиеся решения устойчивы к изменению условий работы объекта. Проблемой может быть также нехватка данных для обучения. Для преодоления ограничений и расширения области применения ИИ необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Бочкова А.А. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем // Надежность. 2025. Т. 25. № 1. С. 44-55. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-44-55
2. Нетес В.А. О соотношении между общетехническими и отраслевыми стандартами по надежности // Стандарты и качество. 2025. № 7. С. 37-40. DOI: 10.35400/0038-9692-2025-7-132-25
3. Нестеренко П. Искусственный интеллект и надежность в технических системах. Точки соприкосновения // Встраиваемые системы. 2010. № 1. С. 44-48.
4. Данбай Ш.А., Алсеитов О.Б., Глепберген М.Ж., Костюков А.В. Риск-ориентированное управление надежностью на основе цифровых технологий и систем искусственного интеллекта КОМПАКС® // Нефтепереработка и нефтехимия. 2018. № 12. С. 3-7.
5. Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Проневич О.Б., Платонов Е.Н., Игнатов А.Н. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 43-53. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53
6. Абдуракипов С.С., Бутаков Е.Б. Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для определения предотказных и аварийных состояний авиадвигателей // Автометрия. 2020. Т. 56, № 6. С. 34-48. DOI: 10.15372/AUT20200605
7. Сай Ван Квонг, Щербаков М.В. Прогнозирование отказов сложных многообъектных систем на основе комбинации нейросетей: пути повышения точности прогнозирования // Прикаспийский журн.: управление и высокие технологии. 2020. № 1 (49). С. 49-60. DOI: 10.21672/2074-1707.2020.49.4.049-060
8. Салихов М.Р., Юрьева Р.А. Алгоритм прогнозирования состояния оборудования на основе машинного обучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65. № 9. С. 648-655. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-648-655
9. Канарский В.А. Прогнозирование отказов насосной станции с помощью машинного обучения без учителя // Вестн. Российского нового ун-та. Сер. «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2022. № 4. С. 62-74. DOI: 10.18137/RNU.V9187.22.04.P.62
10. Пантелеев А.С. Роль искусственного интеллекта в повышении надежности нефтегазового оборудования // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2023. № 12. С. 41-45. DOI: 10.26160/2541-8637-2023-12-41-45
11. Тимашев С.А., Макеева Т.В. Оценка надежности городской водопроводной сети при дефиците информации методом искусственных нейронных сетей: Препр. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2023. 78 с.
12. Батыршин Е.М., Вивчарь Р.М., Пачин А.В. Концепция управления техническим состоянием оборудования на основе нейросетевых технологий искусственного интеллекта // Вооружение и экономика. 2024. № 1 (67). С. 49-55.
13. Тихонов И.Н., Куйчиев О.Р. Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов в механических системах // Экономика и социум. 2024. № 12 (127)-2. С. 1484-1487.
14. Кущенко Р.Р., Соколов О.А. Разработка интеллектуальной подсистемы диагностики отказов в автоматизированной системе управления на основе нейросетевых алгоритмов // Вестн. науки. 2025. Т. 3. № 6 (87). С. 1973-1977.
15. Зубов Д.В., Лебедев Д.А. Диагностика отказов технологического оборудования химических производств

¹ IEC 62740:2015. Root Cause Analysis (RCA); IEC 60050-192:2015. International Electrotechnical Vocabulary – Part 192: Dependability.

водств с помощью искусственного интеллекта // Программные системы и вычислительные методы. 2024. № 2. С. 30-40. DOI: 10.7256/2454-0714.2024.2.70729

16. Шаханов Н.И., Варфоломеев И.А., Ершов Е.В. и др. Прогнозирование отказов оборудования в условиях малого количества поломок // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. 2016. № 6. С. 36-41.

17. Ульянов А.Г. Прогнозирование отказов оборудования на основе аудиоданных с использованием нейросетей // Научный аспект. 2024. № 7. URL: <https://na-journal.ru/7-2024-informacionnye-tehnologii/13888-prognozirovanie-otkazov-oborudovaniya-na-osnove-audiodannyh-s-ispolzovaniem-neirosetei> (дата обращения: 08.01.2026).

18. Горидько К.А., Тимашев Э.О., Волков М.Г. и др. Обзор опыта прогнозирования отказов УЭЦН методами машинного обучения // Neftegaz.RU. 2025. № 1. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/oborudovanie/875411-obzor-opyta-prognozirovaniya-otkazov-uetsn-metodami-mashinnogo-obucheniya/> (дата обращения: 08.01.2026).

19. Вопросы математической теории надежности / Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев, В.А. Каштанов и др.; под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

20. Нетес В.А., Шаров В.В. Взаимосвязь между группами ресурсов общего риска и функцией корреляции аварийных сообщений в системах управления устранением неисправностей // Телекоммуникации и информационные технологии. 2024. Т. 11. № 1. С. 56-62.

21. Нетес В.А. Проактивные методы в обеспечении надежности сетей связи // Сб. тр. XVI Междунар. отраслевой науч.-техн. конф. «Технологии информационного общества». М.: ИД Медиа Паблшер, 2022. С. 155-157.

References

1. Bochkova A.A. Artificial Intelligence: strategies and methods for solving complex problems. *Dependability* 2025;25(1):46-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-26462025-25-1-46-57>.

2. Netes V.A. [On the relationship between general technical and industry standards for reliability]. *Standards and Quality* 2025;7:37-40. (in Russ.) DOI: 10.35400/0038-9692-2025-7-132-25.

3. Nesterenko P. [Artificial intelligence and reliability in technical systems. Points of contact]. *Embedded systems* 2010;1:44-48. (in Russ.)

4. Danbai Sh.A., Alseitov O.B., Tlepbergenov M.Zh., Kostyukov A.V. [Risk-based reliability management based on digital technologies and artificial intelligence systems КОМРАС®]. *Neftepererabotka i Neftekhimiya* 2018;12:3-7. (in Russ.)

5. Shubinsky I.B., Zamyshliaev A.M., Pronevich O.B., Ignatov A.N., Platonov E.N. Application of machine learning methods for predicting hazardous failures of railway track assets. *Dependability* 2020;20(2):43-53. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53>.

6. Abdurakipov S.S., Butakov E.B. Comparative analysis of machine learning algorithms for determining pre-failure and emergency states of aircraft engines. *Avtometriya* 2020;56(6):34-48. (in Russ.) DOI: 10.15372/AUT20200605.

7. Sai Van Cuong, Shcherbakov M.V. Failure prediction of complex multiple-component systems based on a combination of neural networks: ways to improve the accuracy of forecasting. *CASPIAN JOURNAL: Control and High Technologies* 2020;1(49):49-60. (in Russ.) DOI: 10.21672/2074-1707.2020.49.4.049-060.

8. Salikhov M.R., Yuryeva R.A. [An algorithm for predicting the condition of equipment based on machine learning]. *Journal of Instrument Engineering* 2022;65(9):648-655. (in Russ.) DOI: 10.17586/00213454-2022-65-9-648-655.

9. Kanarsky V.A. Predicting pumping station failures using unsupervised machine learning. *Vestnik of Russian New University. Series Complex systems: models, analysis, management* 2022;4:62-74. (in Russ.) DOI: 10.18137/RNU.V9187.22.04.P.62.

10. Panteleev A.S. The role of artificial intelligence in improving the reliability of oil and gas equipment. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika* 2023;12:41-45. (in Russ.) DOI: 10.26160/2541-8637-2023-12-41-45.

11. Timashev S.A., Makeeva T.V. [Assessment of the reliability of the urban water supply network in case of information shortage by the method of artificial neural networks]. Prepr. Yekaterinburg: Ural University Publishing; 2023. (in Russ.)

12. Baty`rshin E.M., Vivchar` R.M., Pachin A.V. The Concept of Equipment Technical Condition Management Based on AI Neural Network Technology. *Armament and Economics* 2024;1(67):49-55. (in Russ.)

13. Tikhonov I.N., Kuychiyev O. Comparative analysis of machine learning algorithms for predicting failures in mechanical systems. *Economy and society* 2024;12(127):1484-1487. (in Russ.)

14. Kushchenko R.R., Sokolov O.A. Development of an intelligent subsystem diagnostics of failures in an automated system management based on neural network algorithms. *Vestnik nauki* 2025;3(6(87)):1973-1977. (in Russ.)

15. Zubov, D.V., Lebedev, D.A. Diagnostics of failures of technological equipment of chemical industries using artificial intelligence. *Software systems and computational methods* 2024;2:30-40. DOI: 10.7256/2454-0714.2024.2.70729.

16. Shakhonov N.I., Varfolomeev I.A., Yershov E.V. et al. [Forecasting of equipment failures in conditions of a small number of breakdowns]. *Cherepovets State University Bulletin* 2016;6:36-41. (in Russ.)

17. Ulyanov A.G. [Forecasting equipment failures based on audio data using neural networks]. *Nauchny aspekt* 2024;7. (accessed: 08.01.2026). Available at: <https://na-journal.ru/7-2024-informacionnye-tehnologii/13888-prognozirovanie-otkazov-oborudovaniya-na-osnove-audiodannyh-s-ispolzovaniem-neirosetei>. (in Russ.)

18. Goridko K.A., Timashev E.O., Volkov M.G. et al. [An overview of the experience of predicting ESP failures

using machine learning methods]. *Neftegaz.RU* 2025;1. (accessed: 08.01.2026). Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/oborudovanie/875411-obzor-opyta-prognozirovaniya-otkazov-uetsn-metodami-mashinnogo-obucheniya>. (in Russ.)

19. Barzilovich E. Yu., Beliaev Yu. K., Kashtanov V. A. et al. Gnedenko B. V., editor. [Matters of mathematical dependability theory]. Moscow: Radio i svyaz; 1983. (in Russ.)

20. Netes V. A., Sharov V. V. Relationship between shared risk resource groups and the alarm correlation function in fault management systems. *Telecommunications and Information Technologies* 2024;11(1):56-62. (in Russ.)

21. Netes V. A. [Proactive methods in ensuring the reliability of communication networks]. In: Proceedings of the XVI International Industry Science and Technology Conference Technologies of the Information Society. Moscow: ID Media Publisher; 2022. Pp. 155-157. (in Russ.)

Сведения об авторе

Виктор Александрович Нетес – доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и систем комму-

тации Московского технического университета связи и информатики, Москва, Российская Федерация, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru.

About the author

Victor A. Netes, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Communication Networks and Switching Systems, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru.

Вклад автора

В.А. Нетес выполнил обзор публикаций, выявил рассмотренные в них задачи и методы их решения, имеющиеся трудности и пути их преодоления, предложил новые возможные области применения искусственного интеллекта для обеспечения надежности.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Хаим Борисович Кордонский (1919–1999): ученый, опередивший время¹



Резюме. Статья посвящена жизни и научному наследию Хаима Борисовича Кордонского (1919–1999) – выдающегося советского ученого, основателя научной школы в области прикладной статистики и теории надежности. Рассмотрены ключевые направления его деятельности: пионерские работы по статистическому контролю качества, создание научных основ обеспечения надежности авиационной техники, фундаментальный вклад в теорию цензурированных выборок и несмещенного оценивания сложных систем. Особое внимание уделено его роли в разработке первой в мире компьютерной системы составления расписания полетов для гражданской авиации. Отмечен его вклад как педагога, подготовившего более 50 кандидатов и докторов наук. Научные работы Кордонского сохраняют актуальность и продолжают цитироваться в международных исследованиях.

Введение

Хаим Борисович Кордонский – имя, которое стоит в одном ряду с выдающимися советскими учеными, применившими строгий язык математики к решению сугубо практических задач. Его жизнь и работа стали мостом между фундаментальной наукой, рожденной в ленинградской математической школе, и высокими требованиями реального мира – от контроля качества на заводах до обеспечения безопасности полетов и создания первых в мире компьютерных систем управления в гражданской авиации. Он был не только блестящим математиком-статистиком, но и талантливым организатором, педагогом, воспитавшим целую плеяду ученых.

1. Становление ученого: От Ленинграда до Риги

Хаим Кордонский родился в 1919 году. В 1941 году он окончил математико-механический факультет Ленинградского Университета по специальности «механик». Его студенческие годы были прерваны войной, где он служил солдатом в Народном ополчении, а затем стал слушателем курсов в Ленинградской Военно-Воздушной Академии, служил в авиационной эскадрилье и на авиаремонтном заводе.

Судьбоносным для его научной карьеры стал период адъюнктуры (1947–1950 гг.) в Ленинградской Военно-Воздушной Академии. Его научным руководителем был академик Юрий Владимирович Линник – гигант в области теории вероятностей и математической статистики. Это определило основное научное направление Кордонского.

После защиты кандидатской диссертации в 1950 году он был направлен в Ригу, в Рижское Высшее Военное Авиационное училище. С этим городом и его институтами (позже РИИ ГА, РКИИ ГА, РАУ) была связана вся

его последующая трудовая жизнь. Более 30 лет он заведовал кафедрой «Технологии ремонта и производства летательных аппаратов», став не просто преподавателем, а создателем мощной научной школы.

2. Пионер вероятностно-статистических методов

Научное наследие Кордонского можно условно разделить на два больших направления. Первое – это вклад в развитие и внедрение вероятностно-статистических методов в инженерию и теорию надежности.

Его первые работы, начавшиеся в 1950-х годах, были посвящены статистическому контролю качества продукции. В то время это было передним краем прикладной математической статистики. Его статьи в «Вестнике машиностроения», «Теории вероятностей и ее применениях» и других изданиях заложили основы методов, которые используются до сих пор. Под его руководством внедрялись статистические методы на таких гигантах, как завод ВЭФ, «Автоэлектроприбор», Вагоностроительный и Дизельный заводы.

Краеугольным камнем его ранней научной деятельности был вклад в область статистического контроля качества (СКК).

В послевоенные годы, в 1950-е годы, советская промышленность столкнулась с острой необходимостью повышения качества продукции. Массовое производство требовало эффективных и экономичных методов контроля. Сплошной контроль каждой единицы продукции был дорог, медлителен и зачастую просто невозможен. На этом фоне статистические методы, основанные на выборочном контроле, стали настоящим спасением.

Ведущая роль в разработке этих методов в СССР принадлежала ленинградской математической школе, и ключевой фигурой здесь был А.Н. Колмогоров. Его основополагающая статья 1951 года «Статистический приемочный контроль при допустимом числе дефектных изделий, равном нулю» задала вектор развития для многих ученых, включая Кордонского.

¹ В основу статьи положен доклад, зачитанный проф. А.М. Андроновым на International Conference Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RELSTAT'05) Riga, Latvia, November, 2006.

Кордонский не был кабинетным теоретиком. Его сила заключалась в уникальном сочетании глубокого знания математики и понимания реальных производственных процессов. Он взял сложный аппарат математической статистики (такой как цепи Маркова) и адаптировал его для решения прикладных задач заводских цехов.

Основные проблемы, которые он решал:

– **Контроль на потоке.** Как оценивать качество продукции, которая непрерывно сходит с конвейера? Традиционные методы, разработанные для контроля партий, здесь не подходили.

– **Повышение эффективности контроля.** Как минимизировать объем выборки (и, таким образом, затраты на контроль), сохраняя при этом высокую достоверность выводов о качестве всей партии?

– **Анализ и прогнозирование.** Не просто констатировать брак, но и понимать закономерности его появления, чтобы управлять качеством на опережение.

Ключевые работы того времени (из предоставленного списка видно, как эволюционировали его исследования в этой области):

1953 г.: «Статистический приемочный контроль на поточной и конвейерной линиях». Это была одна из первых работ, где специально рассматривались особенности СКК в условиях непрерывного производства. Кордонский разрабатывал планы контроля, которые были адекватны ритму конвейера, где нет четко выделенных «партий».

1955 г.: «Приложение теории цепей Маркова к контролю партий». Здесь проявилась его математическая подготовка. Цепи Маркова – математическая модель, описывающая последовательность случайных событий, где вероятность каждого события зависит от состояния, достигнутого в предыдущем событии. Кордонский применил этот аппарат для моделирования процесса контроля, когда решение о дальнейшей проверке партии (увеличить выборку, принять или забраковать) зависит от результатов предыдущих проверок. Это позволяло строить более гибкие и оптимальные планы контроля.

1956 г.: «Простейшая форма контроля продукции». Эта работа демонстрирует его стремление к практической реализации. Он понимал, что для широкого внедрения методы должны быть не только точными, но и простыми для применения инженерами и технологами. Он разрабатывал упрощенные, но научно обоснованные методики.

1958 г.: «Анализ точности и контроль качества в машиностроении» (в соавторстве с А.К. Кутай). Это уже крупная, систематизирующая работа. Она вышла в ведущем издательстве «Машгиз» и стала практическим руководством для инженеров-машиностроителей. В книге подробно разбирались, как статистические методы позволяют анализировать точность станков и технологических процессов, а не просто отсеивать брак.

1961 г.: «Распределение числа дефектных единиц в партиях изделий». Эта публикация в авторитетнейшем журнале «Теория вероятностей и ее применения» показывает, что его прикладные исследования имели

серьезное теоретическое подкрепление. Он углубленно изучал вероятностные распределения, лежащие в основе появления дефектов, что позволяло создавать более точные модели и прогнозы.

Теория без практики была для Кордонского бессмысленной. В 1950–1955 гг. под его руководством внедрялись статистические методы контроля качества на заводе ВЭФ, а также он консультировал службы надежности заводов «Автоэлектроприбор», Вагоностроительного и Дизельного. Это означает, что его алгоритмы и методики реально работали на крупнейших промышленных предприятиях СССР, повышая качество и снижая издержки.

Самым ярким свидетельством значимости его ранних работ является тот факт, что на них ссылаются спустя десятилетия. В 2006 году на международном симпозиуме в Израиле в статье о оптимальных планах статистического приемочного контроля его имя стояло в одном ряду с такими классиками, как Ван дер Варден.

Вклад Хаима Борисовича Кордонского в статистический контроль качества заключался в следующем:

– математизация (он поднял прикладные задачи контроля на новый уровень строгости, применяя передовые разделы математики (цепи Маркова, теория вероятностей));

– адаптация (он разработал специализированные методы для современных типов производства (поточные и конвейерные линии));

– внедрение (он напрямую связывал науку с производством, активно внедряя свои разработки на заводах);

– систематизация (его книги и статьи стали мостом между математиками-статистиками и инженерами-практиками).

Именно с этой прочной основы – глубокого понимания статистических методов контроля – он впоследствии перешел к решению еще более сложных задач надежности авиационной техники и создания компьютерных систем.

В 1963 году вышла его знаковая книга «Приложения теории вероятностей в инженерном деле». Это была одна из первых книг, которая доступным языком объясняла сложные вероятностно-статистические методы инженерам-практикам, открывая им дорогу к применению этих инструментов в повседневной работе.

3. Архитектор компьютерной эры в гражданской авиации

В 1965 году Кордонский был приглашен для формирования научных направлений в только что созданном Научно-вычислительном центре (НВЦ) ГА, позже преобразованном в ЦНИИ АСУ ГА. Так началась его вторая великая миссия.

Почти 35 лет он был научным руководителем работ по созданию Центрального компьютерного расписания движения самолетов Аэрофлота – крупнейшей авиакомпании мира того времени. Это был проект колоссальной сложности, особенно с учетом уровня вычислительной техники 1960–70-х годов («Урал-4», перфоленты, лентотипы).

Благодаря таланту Кордонского и самоотверженности его команды (В. Венявцев, И. Герцбах, М. Максим, Ю. Парамонов, В. Линис и др.) впервые в мире регулярное расписание движения гигантской авиакомпании стало составляться с помощью компьютера. Его подход был гениально прост: «Прежде чем начать делать расписание на компьютере, научитесь делать его вручную». Это позволяло понять саму суть задачи, отделить главное от второстепенного.

Как вспоминал Илья Герцбах, Кордонский создавал в коллективе уникальную демократическую атмосферу, где ценились дискуссии, критика и свободный обмен мнениями, что и стало ключом к успеху этого амбициозного проекта.



Работая в авиационном институте, Кордонский сразу увидел огромный потенциал применения своей науки к задачам надежности и безопасности полетов. Он решал сложнейшие практические проблемы: определение необходимого количества самолетов-лидеров для опережающего контроля, прогнозирование развития усталостных трещин, оптимизация сроков технического обслуживания и ремонта. Благодаря глубокому пониманию как математики, так и физики процессов (например, износа и усталости материалов), его модели отличались адекватностью и практической ценностью. Он стал непререкаемым авторитетом в Министерстве гражданской авиации.

Вообще, вклад Х.Б. Кордонского в надежность авиационной техники был центральной и наиболее плодотворной темой его научной деятельности, где он выступил как настоящий новатор.

Рижский авиационный институт, где работал Кордонский, готовил не конструкторов, а инженеров по эксплуатации. Это порождало совершенно уникальный круг задач, отличных от задач авиастроения:

– высочайшие требования (любая неисправность в авиации потенциально ведет к катастрофе; требовалась не просто «достаточная» надежность, а максимально возможная, подкрепленная научными расчетами);

– экономика (простое увеличение частоты ремонтов и проверок вело к колоссальным затратам и простоям самолетов; нужно было найти оптимальный баланс между безопасностью и экономической эффективностью);

– «живой» парк (эксплуатанты работают не с идеальными новыми самолетами, а с парком машин разного возраста, с разной историей нагрузок и ремонтов; нужно было управлять надежностью этой сложной, стареющей системы).

Кордонский блестяще увидел в этих проблемах огромное поле для применения вероятностно-статистических методов.

Например, прогнозирование и мониторинг состояния парка самолетов. Проблема заключается в сложности предсказания конкретный узел или конструкция самолета достигнет предельного состояния. Как, не разбирая каждый самолет, оценить состояние всего парка? Кордонский разработал научно обоснованные методы использования «самолетов-лидеров» – специально выделенных самолетов, которые эксплуатировались в более интенсивном режиме или имели опережающий налет. Анализируя данные с этих лидеров (появление усталостных трещин, износ деталей), можно было с заданной вероятностью прогнозировать состояние всего парка.

Другая задача – оптимизация систем технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Проводить проверки и ремонты слишком часто – дорого и неэффективно. Проводить слишком редко – опасно. Как найти оптимальные интервалы? Кордонский разрабатывал вероятностные модели отказов. Вместо детерминированного подхода («деталь служит 1000 часов») он рассматривал срок службы как случайную величину с определенным законом распределения. Классика – применение логарифмически-нормального распределения. Кордонский объяснял, что этот закон описывает поведение объектов, которые «упрочняются» со временем (скорость износа падает). Прежде чем применять его, инженер должен был понять физику процесса: а обладает ли данная деталь таким свойством? Это показывает его глубокий подход, связывающий математику с физикой процесса. На основе этих моделей рассчитывались оптимальные сроки проведения инспекций, замены узлов и капитальных ремонтов, минимизирующие риск отказа при заданных затратах.

Анализ и прогнозирование развития повреждений (например, усталостных трещин) – еще одна задача. Например, при проверке обнаружили трещину. Что делать? Немедленно снимать самолет с линии? Или он может летать еще 100 часов? Как спрогнозировать скорость роста этой трещины? Решение Кордонского заключалось в создании математических моделей роста трещин, основанных на данных мониторинга. Это позволяло оценить «остаточный ресурс» элемента конструкции. Это направление напрямую связано с его более поздними работами по исчислению времени деградации в параллельных временных шкалах (календарное время, число взлетов-посадок, часы наработки в крейсерском

режиме). Один и тот же самолет «старел» по-разному в зависимости от типа эксплуатации.

4. Фундаментальный вклад в математическую статистику

Хотя Кордонский решал сугубо прикладные задачи, его решения требовали глубокого теоретического переосмысления классического статистического аппарата. Два его ключевых достижения – это пионерская работа с цензурированными выборками и новаторское применение теории несмещенного оценивания к сложным системам.

Классическая математическая статистика середины XX века была в основном построена на анализе полных выборок. Это означало, что для оценки распределения случайной величины (например, времени до отказа двигателя) исследователь должен был иметь точные значения этой величины для каждого объекта в выборке: объект 1 отказал в момент t_1 , объект 2 – в момент t_2 , и так далее.

В реальной авиационной практике (и не только) это невозможно и преступно: самолеты снимают с эксплуатации для планового ремонта, будучи исправными; детали заменяют по истечению назначенного ресурса, не дожидаясь их отказа; наблюдение за некоторыми самолетами может быть прекращено по причинам, не связанным с изучаемым отказом (например, списание).

В результате статистик получает точное время отказа (для тех единиц, что отказали) и время цензурирования: для остальных единиц известно только, что их время жизни превышает некоторую величину (например, налет до планового ремонта). Такие данные были «неудобными» для стандартных методов. Игнорировать цензурированные наблюдения – значит выбрасывать ценнейшую информацию и получать смещенные, пессимистичные оценки.



Вклад Кордонского заключался прежде всего в формализации проблемы. Он одним из первых в СССР (и в мире) четко сформулировал этот класс задач как центральный для анализа надежности и начал систематически его изучать. Для решения проблемы он предложил «Метод разделяющих разбиений» и, что крайне

важно, адаптировал и развил метод максимального правдоподобия (ММП) для работы с цензурированными данными. Его работы 1966-1986 годов (напр., «Модели отказов», статьи в «Теории вероятностей и ее применениях» и «Технической кибернетике») дали строгое математическое обоснование таким оценкам. Он рассматривал задачи, когда цензурирование происходит не только в одной точке, но и на траекториях в фазовом пространстве, и когда на объект действует несколько конкурирующих причин отказов.

То, что начиналось как решение узкоотраслевой задачи, выросло в целое направление современной математической статистики – «Анализ данных о выживаемости и цензурированные выборки» (Survival Analysis and Censored Data). Сегодня это один из самых востребованных разделов в медицине (анализ времени выживания пациентов), инженерии, экономике и социологии. Сотни известных математиков во всем мире работают в этой области, опираясь на фундамент, который в значительной степени был заложен такими практиками, как Кордонский.

Еще одна задача была решена Кордонским в теории несмещенного оценивания для сложных систем. Суть проблемы заключалась в том, что в 1950-60-е годы, когда статистические методы только начинали массово внедряться, основное внимание уделялось поиску «наилучших» оценок для параметров отдельных случайных величин. Под «наилучшими» понимались несмещенные оценки с минимальной дисперсией (НМО). Например, для нормального распределения было известно, что выборочное среднее – это НМО для математического ожидания. Проблема возникла, когда инженеры перешли к анализу сложных систем, чья эффективность описывается функцией от многих случайных параметров. Например, среднее время ожидания в системе массового обслуживания является сложной функцией от интенсивности входного потока и времени обслуживания.

Так называемый «наивный» подход заключался в поиске «наилучшей» несмещенной оценки для каждого параметра системы в отдельности (λ для интенсивности потока, μ для времени обслуживания) и подстановки этих оценок в формулу для показателя эффективности системы: $\hat{W} = f(\hat{\lambda}, \hat{\mu})$. Недостаток подхода заключался в том, что этот метод игнорирует тот факт, что даже если λ и μ являются несмещенными оценками по отдельности, их нелинейная функция $\hat{W} = f(\hat{\lambda}, \hat{\mu})$ уже не будет несмещенной оценкой для истинного среднего времени ожидания W . Для малых выборок это могло приводить к систематическим и значительным ошибкам при оценке характеристик всей системы.

Вклад Кордонского заключался в смене парадигмы: он осознал, что для сложных систем нужно оценивать не параметры элементов, а непосредственно показатель эффективности системы в целом. К решению задачи он применил фундаментальную теорию. Под его руководством впервые в СССР (а возможно, и в мире) фундаментальные результаты таких гигантов,

как С.Р. Рао (теорема Рао-Блэкуэлла), А.Н. Колмогорова и Д. Блэкуэлла, были применены не в абстрактной теории, а для практического оценивания характеристик сложных систем. Его школа разработала методы построения несмещенных оценок для таких сложных функций, как полиномы от моментов, характеристики систем массового обслуживания и показатели надежности резервированных систем.

Яркий пример – его вопрос ученику, А.М. Андронову: «Саша, а как Вы будете оценивать среднее время ожидания...?» Этот вопрос запустил целую серию исследований, результаты которых были опубликованы в ведущих журналах и монографиях. Кордонский и его школа показали, что «наивный» Plug-In Method – это лишь первое, часто несовершенное приближение. Они заложили основы для корректного статистического вывода о свойствах сложных систем, когда целью является не оценка входных параметров, а оценка выходного показателя. Это имело огромное значение для адекватного прогнозирования надежности и эффективности сложных технических и организационных систем.

Фундаментальный вклад Кордонского заключается в том, что он, оставаясь практиком, расширил границы математической статистики, заставив ее работать с реальными, «неидеальными» данными (цензурирование) и решать реальные, системные задачи (оценивание сложных функций). Он был мостом между абстрактными теоремами и инженерной практикой, и в процессе построения этого моста он создал новые, востребованные временем направления в самой теории.

Под его руководством теория несмещенного оценивания была впервые применена для оценки показателей эффективности сложных систем в целом, а не только их отдельных элементов. Это был прорывной подход, который учитывал, что «хорошие» оценки для частей системы не обязательно дают «хорошую» оценку для системы в целом.

Результатом этой деятельности стали монографии, многие из которых стали классикой: «Модели отказов» (в соавторстве с И.Б. Герцбахом, переиздана Springer), «Вероятностный анализ процессов изнашивания», а также публикации в ведущих советских и международных журналах.

5. Наследие и ученики

Пуа Gertsbakh пишет во вступительной статье сборника трудов конференции 1999 г. *Aviation Reliability-99*, посвященной 80-летию Хайма Борисовича Кордонского:

Together with Yu.Paramonov, V.Venyavcev, M.Maksim and V.Linis, I worked on this project during seven years, which were probably the most productive and most interesting in my whole life. Now I realize that we all were extremely lucky to work under the guidance of a brilliant scientist and an outstanding personality of Khaim Borisovich.

The scheduling project was a very difficult and complex task. Nobody from the high management in the Ministry had even a slightest idea how to approach it and what is meant under the title “Computerized Scheduling”. On top of that, the computers in those days were extremely primitive. “Ural-4” which occupied the whole floor of an old church, has less power than today’s pocket calculator. Even having modern computer power, one should be a man of an outstanding intellectual courage to accept the challenge to be the head of such project.

From prof. Kordonsky we learner important things, and for all life. The first lesson was: before you start doing the computerized schedule, be able to do it manually. This was a clever advice because only after a year of intensive contacts with practitioners, we started to understand what the scheduling is about, was is essential and what is secondary.

Prof. Kordonsky never was a “boss” who issued order and instructions. He created a stimulating atmosphere of intensive exchange of opinions and discussions, sometimes heated, but always efficient. He was open to any suggestion and critical remark. In spite of this tremendous scientific authority, nobody was afraid of asking questions or of insisting on this opinion. I am convinced that a truly democratic in our group was the key factor for the success of the project.

В последние годы пребывания в Латвии Хайм Борисович Кордонский увлекся применением вероятностно-статистических методов в медицине, в частности, при диагностике работы сердца. За полученные здесь результаты в 1985 г. ему была присуждена Государственная премия Латвии.

Последние работы Хайма Борисовича Кордонского посвящены теории исчисления времени деградации систем, наработка которых измеряется в различных шкалах (календарном времени, числе циклов, часах наработки в разных режимах и т.п.). Большинство из этих работ опубликованы в ведущих зарубежных научных журналах.

Даже в последние годы жизни Кордонский продолжал исследовать новые frontiers, применяя свои методы в медицине (диагностика работы сердца), за что в 1985 году был удостоен Государственной премии Латвии, и развивая теорию исчисления времени деградации систем в различных временных шкалах.

Но, пожалуй, главным его наследием стали ученики. Под его руководством было подготовлено более 50 докторов и кандидатов наук. Его последователи сегодня работают по всему миру – от Канады до Австралии, многие стали ведущими учеными в Латвии (члены-корреспонденты ЛАН Н. Салиниекс и Я. Рудзитис, профессора Ю. Парамонов, А. Андронов, Ю. Мартынов и др.).

Заключение

Кордонский стал непререкаемым авторитетом в Гражданской авиации. Министерство, научно-исследовательские институты (ГосНИИ ГА) и ремонтные

предприятия обращались к нему за консультациями и рекомендациями. Его работы публиковались в ведущих советских и международных журналах. Монография «Модели отказов» (1966, в соавторстве с И.Б. Герцбахом) стала международным бестселлером и была переиздана Springer. На кафедре под его руководством сформировался мощный научный коллектив. Защита кандидатской диссертации его ученика, Ильи Герцбаха, где официальным оппонентом был сам академик Б.В. Гнеденко (отец-основатель теории надежности в СССР), стало событием всесоюзного масштаба.

Хаим Кордонский не просто применял готовые статистические формулы к авиации. Он создавал новые математические аппараты для решения специфических, жизненно важных задач авиационной эксплуатации. Его работы заложили основу для прогнозного (предиктивного) обслуживания, которое сегодня, в эпоху Big Data и IoT, является стандартом в современной авиации. Он превратил обеспечение надежности из искусства инженеров-практиков в строгую науку, основанную на вероятностных моделях и статистических выводах.

Хаим Борисович был ученым-универсалом, чьи работы заложили основы современных методов надежности, статистического анализа данных и даже искусственного интеллекта в планировании. Он обладал редким даром – видеть глубокую математическую суть в практических задачах и находить для них изящные и эффективные решения. Его жизнь – это пример того, как теоретическая мысль, будучи воплощенной в практику, способна менять целые отрасли и обеспечивать безопасность и эффективность в масштабах страны.

Список ключевых работ

Кордонский Х.Б. (1953) Статистический приемочный контроль на поточной и конвейерной линиях. Вестник машиностроения, 7.

Кордонский Х.Б. (1955) Приложение теории цепей Маркова к контролю партий. Вестник Ленинградского университета, 11.

Кордонский Х.Б. (1956) Простейшая форма контроля продукции. Стандартизация, 5.

Кутай А.К., Кордонский Х.Б. (1958) Анализ точности и контроль качества в машиностроении, гл. 3, 4. Машгиз, М-Л.

Кордонский Х.Б. (1959) Вероятное качество продукции. Стандартизация, 10.

Кордонский Х.Б. (1961) Распределение числа дефектных единиц в партиях изделий. Теория вероятностей и ее применения, 3.

Кордонский Х.Б. (1964) Расчеты и испытания усталостной долговечности. Труды 4-го Всесоюзного математического съезда, Наука, Москва.

Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. (1966) Модели отказов. Советское радио, Москва. (1969. Gertsbakh I. and Kordonsky Kh. Models of Failures. Springer, Berlin – Heidelberg – New York)

Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. (1966) Модели отказов. Советское радио, Москва.

Кордонский Х.Б. (1967) Вероятностный анализ процессов изнашивания. Наука, Москва.

Кордонский Х.Б., Герцбах И.Б., В.Венявцев., Максим М., Линис В. (1969) Эвристический метод составления авиационного расписания. В сборнике Автоматизация в машиностроении, АН СССР, Москва.

Кордонский Х.Б., Линис В. и др. (1969) Алгоритмы составления планов движения пассажирских самолетов. В Трудах 4-го Конгресса по автоматическому управлению, Варшава.

Кордонский Х.Б., Венявцев В. и др. (1970) Центральное расписание движения самолетов, как часть управления воздушным движением. В Трудах 1-го Международного симпозиума по управлению движением, Версаль.

Артамановский А.В., Кордонский Х.Б. (1970) Оценка максимального правдоподобия при простейшей группировке данных. Теория вероятностей и ее применения, 1.

Андронов А.М., Кордонский Х.Б., Розенблит П.Я. (1972) Применение теории несмещенных оценок в задачах массового обслуживания. Изв. АН СССР Техническая кибернетика.

Кордонский Х.Б., Розенблит П.Я. (1976) О несмещенном оценивании полиномов от моментов. Теория вероятностей и ее применения, 1.

Кордонский Х.Б., Растринин В.Л. (1985) Случайное цензурирование на траекториях в фазовом пространстве. Изв. АН СССР Техническая кибернетика, 6

Кордонский Х.Б., Растринин В.Л., Шулькин З.А. (1986) Оценивание показателей надежности при действии нескольких причин. Изв. АН СССР Техническая кибернетика, 6.

Kh.Kordonsky and I.Gertsbakh. (1993) Choice of the Best Time Scale for Reliability Analysis. *Europ. J. Operat. Res.*, 65.

Kh.Kordonsky and I.Gertsbakh. (1994) Best Time Scale for Age Replacement. *Inter. J. of Reliab., Quality and Safety Engineering*, 1.

Kh.Kordonsky and I.Gertsbakh. (1995) System State Monitoring and Lifetime Scales. I, II. *Reliab. Engineering and System Safety*, 47, 49.

Kh.Kordonsky and I.Gertsbakh. (1997) Multiple Time Scales and the Lifetime Coefficient of Variation: Engineering Applications. *Lifetime Data Analysis*, 3.

Kh.Kordonsky and I.Gertsbakh. (1997) Fatigue Crack Monitoring on Parallel Time Scales. *Proceedings of ESREL 97, Lisbon, June 17-20, 1997*, 2.

Kh.Kordonsky and I.Gertsbakh. (1997) Optimal Preventive Maintenance in Heterogeneous

Kh.Kordonsky and I.Gertsbakh. (1998) Parallel Time Scales and Two-Dimensional Manufacturer and Individual Customer Warranties. *IIE Transactions*, 30.

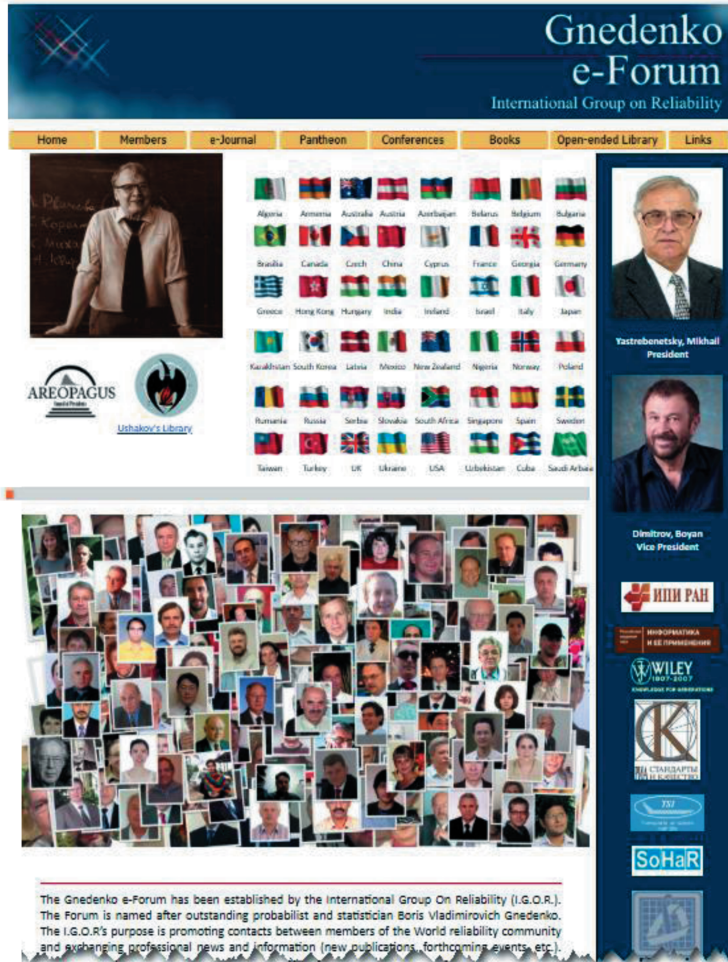
Kordonsky Kh.B., Gertsbakh I.B. (1999) Using Entropy Criterion for Job-Shop Scheduling Algorithm. *Environment. Europ. J. Operat. Res.*, 98.

Бочков А.В.
29.11.2025



GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY



Gnedenko Forum основан в 2004 году неофициальной международной группой экспертов в области теории надёжности для профессиональной поддержки исследователей всего мира, заинтересованных в изучении и развитии научных, технических и пр. аспектов теории надёжности, анализа рисков и безопасности в теоретической и прикладной областях.

Форум создан в сети Интернет как некоммерческая организация. Его цель – привлечь к совместному обсуждению и общению технических специалистов, заинтересованных в развитии теории надёжности, безопасности и анализа рисков, независимо от места их проживания и принадлежности к тем или иным организациям.

Форум выступает в качестве объективного и нейтрального лица, распространяющего научную информацию для прессы и общественности по вопросам, касающимся безопасности, анализа риска и надёжности сложных технических систем. Он публикует обзоры, технические документы, технические отчеты и научные эссе для распространения знаний и информации.

Форум назван в честь Бориса Владимировича Гнеденко, выдающегося советского математика, специалиста в области теории вероятностей и её приложений, академика Украинской академии наук. Форум является площадкой для распространения информации о стипендиях, академических и профессиональных позициях, открывающихся в профессиональной области надёжности, безопасности и анализа рисков по всему миру.

В настоящее время в Форуме состоят 500 участников из 47 стран мира.

Начиная с января 2006 года, Форум выпускает свой ежеквартальный журнал Reliability: Theory & Applications (www.gnedenko.net/RTA). Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321) и публикует статьи, критические обзоры, воспоминания, информацию и библиографии на теоретические и прикладные аспекты надёжности, безопасности, живучести, технического обслуживания и методы анализа и управления рисками.

С 2017 года журнал индексируется в международной базе Scopus.



Членство в GNEDENKO FORUM не подразумевает никаких обязательств. Достаточно прислать по адресу a.bochkov@gmail.com свою фотографию и краткую профессиональную биографию (резюме). Образцы можно найти на <http://www.gnedenko.net/personalities.htm>

www.gnedenko.net

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Требования к формату статьи

Статья представляется в редакцию в электронном формате, в виде файла, созданного в текстовом редакторе MS Word из пакета Microsoft Office (файл с расширением *.doc или *.docx). Текст набирается черным шрифтом на листе формата А4 с полями: левое, верхнее, нижнее – 2 см; правое – 1,5 или 2 см. Минимальный объем статьи – 5 страниц, максимальный (может быть увеличен по согласованию с редакцией) – 12 страниц. При этом статья включает структурные элементы, описание которых представлено ниже.

Структура материала статьи

Представленные ниже структурные элементы статьи отделяются друг от друга *пустой строкой*. Отдельные примеры оформления, как это должно выглядеть в тексте, выделены *синим шрифтом*.

1) Название статьи

Название статьи представляется на русском и английском языках. Название статьи на русском языке должно соответствовать содержанию статьи. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Оформление: Текст названия набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». Точка в конце не ставится.

Пример:

Повышение надежности электронных компонентов
The Increasing of dependability of electronic components

2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «*»;

- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

паспорта и/или публикаций, для транслитерации фамилии и имени необходимо использовать стандарт BSI.

Оформление: Текст ФИО набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». ФИО разделяются запятой, точка в конце не ставится.

Пример:

Иванова А.А.¹, Петров В.В.^{2*}
Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

Место работы авторов приводится на русском языке, перед указанием места набирается верхним индексом (надстрочным) соответствующая цифра сноски, указывающая на имя автора.

Оформление: Текст места работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

²Санкт-Петербургский институт теплоэнергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург

4) Адрес электронной почты автора, который будет вести переписку с редакцией

Оформление: Текст адреса набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «*». Точка в конце не ставится.

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

Оформление: Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

Пример (на рус. яз.):

Резюме. Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

Оформление: Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

Пример (на рус. яз.):

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, техническая эффективность.

7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

Оформление:

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например: где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь подрисовочные подписи. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. Отсылки на рисунки оформляются следующим образом: «На рис. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. рис. 3)». Сокращение «рис.» и номер рисунка (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Подрисовочная подпись включает порядковый номер рисунка и его название. Располагается на следующей строке после рисунка и выравнивается по центру:

Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после подрисовочной подписи не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисовочном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями *.tiff, *.png, *.gif, *.jpg, *.eps.

Таблицы должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Таблицы должны быть пригодны для редактирования (а не отсканированные или в виде рисунков). Все таблицы должны иметь заголовки. Таблицы нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В табл. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. табл. 3)». Сокращение «табл.» и номер таблицы (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название. Располагается на строке, предшествующей таблице и выравнивается по центру:

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после заголовка таблицы не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения (символы), приведен-

ные в таблицах, необходимо пояснять в основном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях в таблице и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов).

Математические обозначения в тексте набираются заглавными и строчными буквами латинского, греческого и русского алфавитов. Латинские символы всегда набираются наклонным шрифтом (курсивом), кроме обозначений функций, таких как \sin , \cos , \max , \min и т.п., которые набираются прямым шрифтом. Греческие и русские символы всегда набираются прямым шрифтом. Размер шрифта основного текста и математических обозначений (включая формулы) должен быть одинаков; верхние и нижние индексы масштабируются в MS Word автоматически.

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = ax + b$, тогда...,
либо набираться в отдельной строке, с выравниванием по центру, например:

$$y = ax + b.$$

При наборе формул как в тексте, так и в отдельной строке, знаки препинания должны ставиться по обычным правилам – точка, если формулой заканчивается предложение; запятая (или отсутствие знака препинания), если предложение после формулы продолжается. Для разделения формулы и текста рекомендуется для строки с формулой устанавливать вертикальные отступы (6 пт перед, 6 пт после). Если в тексте статьи делается отсылка на формулу, то такая формула обязательно набирается отдельной строкой, по правому краю которой указывается номер формулы в круглых скобках, например:

$$y = ax + b. \quad (1)$$

Если формула набирается в отдельной строке и имеет номер, то данная строка выравнивается по правому краю, а формула и номер разделяются знаком табуляции; позиция табуляции (в см) выбирается таким образом, чтобы формула располагалась примерно по центру. Формулы, на которые в тексте делаются отсылки, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

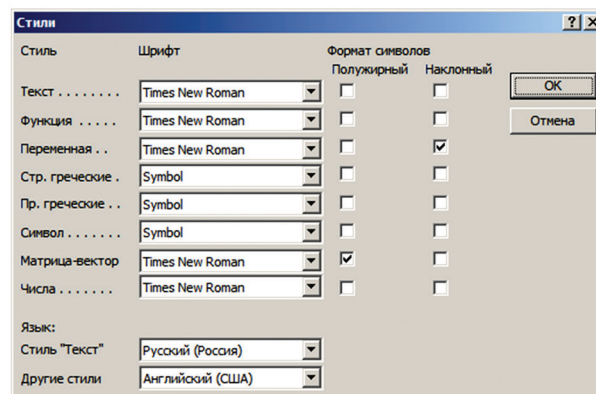
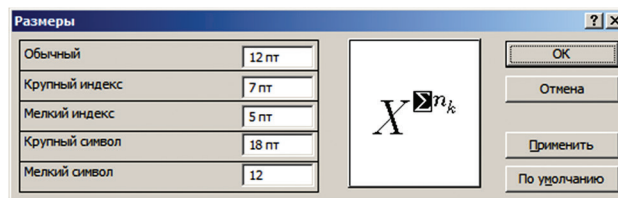
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b\theta.$$

Если формула набирается без применения редактора формул, то между буквами и знаками «+», «-», «=» должны быть набраны неразрывные пробелы (Ctrl+Shift+Spacebar).

Сложные формулы набираются с применением редактора формул. Для отсутствия проблем с редак-

рованием формул и их версткой настоятельно рекомендуется использовать редакторы Microsoft Equation 3.0 или MathType 6.x. Для обеспечения корректного ввода формул (размер символов, их наклон и т.д.) рекомендуемые настройки редактора приведены на рисунках ниже.



При наборе формул в редакторе формул, если требуются скобки, то следует использовать скобки из формульного редактора, а не набирать их на клавиатуре (для корректной высоты скобок в зависимости от содержимого формулы), например (Equation 3.0):

$$Z = \frac{a \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right)}{n + m} \quad (2)$$

Сноски в тексте нумеруются арабскими цифрами, размещаются постранично. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники в сети Интернет, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах и журналах, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования), комментарии автора.

Отсылка на библиографический источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках, а источники приводятся в библиографическом списке в порядке их упоминания в тексте (затекстовые ссылки). Страница указывается внутри скобок, через запятую и пробел после номера источника: [6, с. 8]

8) Благодарности

В этом разделе указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей, но не

являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

9) Библиографический список

В библиографический список включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), упоминающиеся в тексте статьи. Нежелательно включать в библиографический список авторефераты, диссертации, учебники, учебные пособия, ГОСТы, информацию с сайтов, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах, на сайтах и в блогах. Если необходимо сослаться на такую информацию, следует поместить информацию об источнике в сноску.

При описании источника следует указывать его DOI, если удастся его найти (для зарубежных источников удается это сделать в 95% случаев).

Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В ссылках на статьи из журналов должны быть обязательно указаны год выхода публикации, том и номер журнала, номера страниц.

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

Ссылки должны быть верифицированы, выходные данные проверены на официальном сайте журналов и/или издательств.

Оформление:

Оформление ссылок (в русскоязычной версии журнала) должно выполняться по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.

Библиографические ссылки набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» (см. примеры оформления в ГОСТ Р 7.0.5). Каждая

запись имеет нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от записи неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

10) Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество полностью (на русском и английском языках); полный почтовый адрес (включая индекс, город и страну); полное наименование места работы, занимаемая должность; ученая степень, ученое звание, почетные звания; членство в общественных союзах, организациях, ассоциациях и т.д.; официальное англоязычное название учреждения (для версии на английском языке); адрес электронной почты; перечень и номера журналов, в которых ранее публиковались статьи автора; фото авторов для публикации в журнале.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

11) Вклад авторов в статью

Следует указать подробно, каким из авторов что сделано в статье. Например: Автором А. выполнен анализ литературы по теме исследования, автором Б. разработана модель объекта в реальных условиях эксплуатации, выполнен расчет примера и т.д. Даже если у статьи один автор, то требуется указание его вклада.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

12) Конфликт интересов

Конфликт интересов – это условия, при которых у людей возникают вступающие в конфликт или конкурирующие интересы, способные повлиять на принятие редакторского решения. Конфликты интересов могут быть потенциальными или осознанными, а также реально существующими. На объективность могут повлиять личные, политические, финансовые, научные или религиозные факторы.

Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию о конфликте интересов в статью.

Если конфликта интересов нет, автор должен также сообщить об этом. Пример формулировки: «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

Оформление:

Текст набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

GUIDELINES FOR PUBLICATION IN THE JOURNAL «DEPENDABILITY»

STRUCTURAL DEPENDABILITY

- Calculation methods, simulation processes and methods, application software packages, practical calculations of complex system dependability
- Mathematical maintenance theory, practical results of complex systems operation, system lifecycle, optimisation of dependability and cost at lifecycle stages
- Test methods, criteria for making decisions based on test results, accelerated tests, methods for assessing the dependability of systems based on test results

FUNCTIONAL DEPENDABILITY

- Object, subject, and objectives of research, functional dependability indicators, terminology, principles and methods of calculation
- Methods for assessing and predicting the dependability of software, hardware and software systems, taking into account faults, software errors, operator errors, input information errors
- Processes and methods of functional dependability: functionally dependable software design processes, methods for building information processing and control algorithms immune to faults and operator errors, methods and techniques of input information error management, practical results

FUNCTIONAL SAFETY OF SYSTEMS

- Functional safety indicators; safety functions, safety integrity
- Mathematical methods and models for defining the requirements for safety integrity and permissible time of hazardous failure detection, functional safety models of multichannel and multilevel systems
- Processes of functional safety assurance at all lifecycle stages

FAULT TOLERANCE OF SYSTEMS

- Methods of passive failure protection, mathematical models of structural redundancy, gradual degradation of redundant systems, fault masking, results of passive failure protection
- Methods of active protection against structural failures and information process errors, principles and methods of active protection, theoretical foundations of active protection, technical solutions, efficiency evaluations of active protection

RISK MANAGEMENT

- General risk theory, matters of risk formalisation methodology
- Facility-related risk classification. Principles and methods of risk assessment. Methods for defining acceptable levels of risk. Methodology for managing risks of various nature
- Methods and models for identifying integral risks

CERTIFICATION AND STANDARDISATION

- Accreditation of certification bodies and testing laboratories: the state of the art in Russia and abroad. Methods of certifying software and hardware systems according to the requirements of international functional safety standards
- Mandatory and voluntary certification: experience, opinions, suggestions
- System quality and dependability certification: regulatory requirements, test methods, practical results
- The effect of the Law On Technical Regulation on the development of the theory and practice of dependability and functional safety
- State of the art and future trends in the standardisation of dependability, fault tolerance, and survivability, functional safety and risk management

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN DEPENDABILITY AND SAFETY

- Methods for proactively managing dependability and safety
- Methods for assessing dependability and safety in the absence of complete data
- Standardisation of dependability and safety indicators in large systems
- Methods for designing the dependability and safety of unique critical systems

TECHNICAL EFFICIENCY OF CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEMS

- Functional and technical efficiency indicators
- Methods for assessing the technical efficiency of control and management systems
- Design processes for control and management systems with superior efficiency
- Regulatory requirements for technical efficiency of control and management systems

TECHNOLOGICAL ASSET MANAGEMENT

- Technological asset management in large systems
- Methodology of technological asset management
- Management of technological risks in large systems
- Management of resources of composite entities
- Business unit performance evaluation
- Corporate technological asset management platform

BIG DATA. CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- Processes of data wrangling and feature selection for machine learning
- Methods and algorithms of machine learning, development and effects of Big Data application
- Predicting the state dynamics of control and management systems
- Using artificial intelligence in dependability and safety

METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION SECURITY

- Methods for protecting information in automated control and management systems
- Methods for ensuring information security in software
- Information security systems
- Methods and processes for comprehensive functional safety and information security in control and management systems
- Processes for confirming compliance with information security requirements

SYSTEMS ANALYSIS IN DEPENDABILITY AND SAFETY

- Methodology of analytical and system research in dependability and safety
- System research in management and decision-making. Strategic and operational management
- Data collection, processing and prediction. Statistics, probability theory, combinatorics, methods for measuring and simulation in systems analysis studies
- Managing information as part of systems analysis, control and management, decision-making systems

INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

- Purpose and structure of modern ITS. Information and communication technologies and solutions as part of ITS development and operation
- Application and development of international practices in the process of Russian ITS development
- Role and place of safety systems within ITS
- Neural systems and artificial intelligence in ITS
- Reliable data and detection system
- Improved security through video analytics

TERMINOLOGY OF DEPENDABILITY, FAULT TOLERANCE, SAFETY, RISKS, AND SURVIVABILITY

- Methodological matters of dependability, fault tolerance, safety, risk, and survivability terminology research
- Modern concepts in dependability, fault tolerance, safety, risks, and survivability
- The problem of harmonisation and standardisation of terminology in dependability, fault tolerance, safety, risks, and survivability adopted in Russia with the international practice
- Matters of standardisation of the terminology in dependability, fault tolerance, safety, risks, and survivability

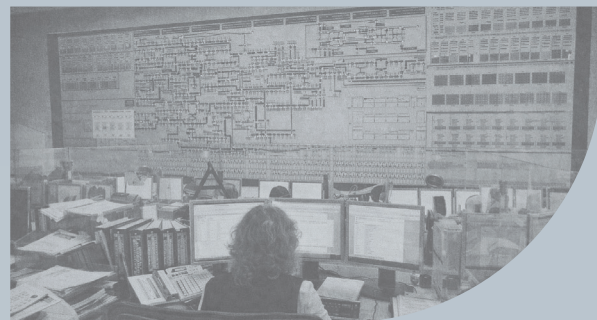
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ
АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ» (АО «НИИАС»)



АО «НИИАС» – ведущий отраслевой научно-технологический институт холдинга «РЖД» в области автоматизации и управления сложными технологическими процессами на железнодорожном транспорте.

ЦЕЛИ:

- эффективность;
- безопасность;
- надежность перевозок.



Направления деятельности:

- системы интервального регулирования и управления движением поездов;
- бортовые устройства безопасности;
- комплексные решения для цифровой станции;
- роботизация технологических процессов;
- моделирование технологических процессов и логистической инфраструктуры;
- информационная безопасность и кибербезопасность;
- транспортная безопасность;
- геоинформационные системы и технологии ДЗЗ;
- проектно-изыскательские работы;
- BIM-технологии;
- лабораторно-испытательный комплекс.

2026

