

НАДЕЖНОСТЬ

ISSN 1729-2646
e-ISSN 2500-3909

ТОМ **26**, №2

2026

НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

В НОМЕРЕ

- ОБЩИЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
- ОБ ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ
- ОЦЕНКА ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ ПАО «РОССЕТИ ЦЕНТР»
- ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ НАДЕЖНОСТЬ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ
- РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБЛАДАЮЩИЕ СВОЙСТВОМ ПОЧТИ ОТСУТСТВИЯ ПАМЯТИ (ALM) И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ
- О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ДЕРЕВА ОТКАЗОВ
- МОДЕЛЬ УГРОЗ БПЛА КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ МОДЕЛИ УГРОЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
- ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ НА БАЗЕ АРХИТЕКТУРЫ ОРС UA КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ СЛОЖНОСТИ КОНФИГУРАЦИИ И ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
- СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТЕНЕВОГО СЕГМЕНТА ИНТЕРНЕТА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УГРОЗ И МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ AI-КРИМИНАЛА

НИИАС

#создаём_окна_возможностей



70
1956-2026

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

ОТКАЗООУСТОЙЧИВОСТЬ 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, ОТКАЗООУСТОЙЧИВОСТИ, 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, профессор кафедры «Защиты информации» МГТУ им. Н.Э. Баумана (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 Любша – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра по управлению качеством и надежностью (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, профессор 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 (СПИИ-РАН), (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. III/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 25.05.2026

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

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов. Организация производства на транспорте

Шебе Х. Общий метод обеспечения безопасности новых технологий для железных дорог 3

Гапанович В.А., Шубинский И.Б. Об отказобезопасности критически важных систем высокоскоростного движения 9

Наумов И.В., Подъячих С.В., Ямщикова И.В., Якупова М.А., Федорова Э.С. Оценка транспорта электрической энергии по электрическим сетям ПАО «Россети Центр» 17

Тимашев С.А., Пономарев В.А. Влияние изменения климата на функциональную надёжность автотранспортных сетей 25

Системный анализ, управление и обработка информации. Статистика

Димитров Б. Распределения, обладающие свойством почти отсутствия памяти (ALM) и их приложения 34

Антонов А.В., Павлов А.С., Саакян С.П., Чепурко В.А. О некоторых аспектах методики анализа дерева отказов 45

Интеллектуальные транспортные системы

Домашкин А.Д., Логинова Л.Н., Ковров А.И. Модель угроз БПЛА как составляющая модели угроз интеллектуальных транспортных систем 51

Змиев Т.Б., Радковский С.А., Трунаев А.М. Предметно-ориентированная информационная модель объектов железнодорожной автоматики на базе архитектуры OPC UA как способ снижения сложности конфигурации и повышения функциональной безопасности 59

Методы и системы защиты информации. Информационная безопасность

Аменицкий А.В., Воробьёв Е.Г. Структурно-функциональная модель теневого сегмента интернета: сравнительный анализ угроз и методов защиты в контексте развития AI-криминала 68

История и перспективы развития теории надёжности и безопасности технических систем: взгляд сквозь время

Статья о Ю.Н. Руденко 73

Форум Б.В. Гнеденко 84

Общий метод обеспечения безопасности новых технологий для железных дорог

On a general safety method for new technologies in railway applications

Хендрик Шебе¹
Hendrik Schäbe¹

¹ Независимый эксперт, Кельн, Германия

¹ Independent Expert, Cologne, Germany

e-mail: dr.hendrik.schaebe@gmail.com



Хендрик Шебе

Резюме. Железнодорожная техника является очень традиционной областью техники по отношению к принципам безопасности, существующим уже более 150 лет, см., например, Пахл [1]. Тем не менее, за последние десятилетия безопасность на железных дорогах стала инновационной. Все началось с электронных автоблокировок, которые требовали нового типа стандартов, см. например, EN 50716 [2], EN 50129 [3]. Это привело к совершенно новому подходу к контролю состояния безопасности электроники – оценке безопасности. Новые разработки, такие как автоматические метрополитены, автоматическое управление поездами (АТО), гиперлуп – поезд на магнитной левитации, движущийся в вакуумированной трубе, использование водорода и искусственного интеллекта, а также растущее значение кибербезопасности требуют дальнейшего развития методов оценки безопасности. В этой статье обсуждается общий подход к обеспечению безопасности железнодорожных систем с использованием современных технологий и обсуждаются сложности оценки безопасности.

Abstract. For more than 150 years (e.g. see Pahl [1]) railways have been very traditional when it came to the safety principles that they applied. Nevertheless, railway safety has become increasingly innovative over the last decades. This started with electronic interlockings that required a new type of standard, such as EN 50716 [2] and EN 50129 [3]. This has led to a completely new approach to assessing whether an electronic device is safe, i.e. the safety assessment. New developments such as automatic underground railways, Automatic Train Operation (ATO), the Hyperloop (a Maglev train running in a low-pressure tube), the use of hydrogen as fuel, the implementation of artificial intelligence, as well as the increasing importance of cybersecurity all require further development of the safety assessment methods. In this paper, an approach to railway system safety with innovative technology is shown and the challenges connected with the safety assessment are discussed.

Ключевые слова: инновационные системы железных дорог, экспертиза безопасности, общий подход

Keywords: innovative systems in railways, safety assessment, general approaches

Для цитирования: Шебе Х. Общий метод обеспечения безопасности новых технологий для железных дорог // Надежность. 2026. №2. С. 3-8. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-3-8>

For citation: Schäbe H. On a general safety method for new technologies in railway applications. Dependability 2026;2: 3-8. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-3-8>

Поступила: 04.12.2025 / **После доработки:** 06.01.2026 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 04.12.2025 / **Revised on:** 06.01.2026 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Эта статья посвящается обсуждению подхода для обеспечения безопасности железнодорожных систем с использованием современных технологий. Также обсуждаем сложности оценки безопасности в этих случаях.

В первом разделе мы кратко излагаем основные принципы оценки безопасности и как она основана на

подходе жизненного цикла, описанном в стандартах CENELEC. Следующие разделы посвящены новым технологиям. В них показано, как стандарты CENELEC используются для обеспечения безопасности системы. Оценка безопасности новых технологий становится простой, поскольку применяется жизненный цикл в соответствии со стандартами CENELEC [2, 3] во всех этих случаях.

1. Принципы оценки безопасности

Оценка безопасности проводится в соответствии с общим подходом, который повторяет общий подход к разработке систем безопасности, см. например ГОСТ Р МЭК 61508 [4]. Так, системы безопасности всегда разрабатываются в соответствии с V-моделью, начиная с этапа разработки концепции и заканчивая утверждением безопасности (рис. 1).

Оценка безопасности следует этому принципу жизненного цикла, отображенного на рис. 1, и начинается с составления плана оценки и анализа документов по безопасности, подготовленных в течение жизненного цикла, а также с проверки процессов, лежащих в основе работ. Этот процесс оценки безопасности является общим и не сосредоточен лишь на определенных конкретными транспортные системы. Однако когда рассматриваются технические детали и конкретные проблемы, эксперты должны обладать специальными знаниями о применяемой технологии. Детали можно найти в стандарте EN 50126 [5], который является адаптацией для железных дорог общего стандарта ГОСТ Р МЭК 61508 [4].

Оценку безопасности следует отличать от процессов верификации и валидации: эксперт по оценке безопасности использует результаты верификаторов и валидаторов, чтобы сделать вывод о пригодности системы для использования по ее назначению, см., например, Шебе [6].

Следовательно, один и тот же подход к оценке безопасности в принципе может быть применен к различ-

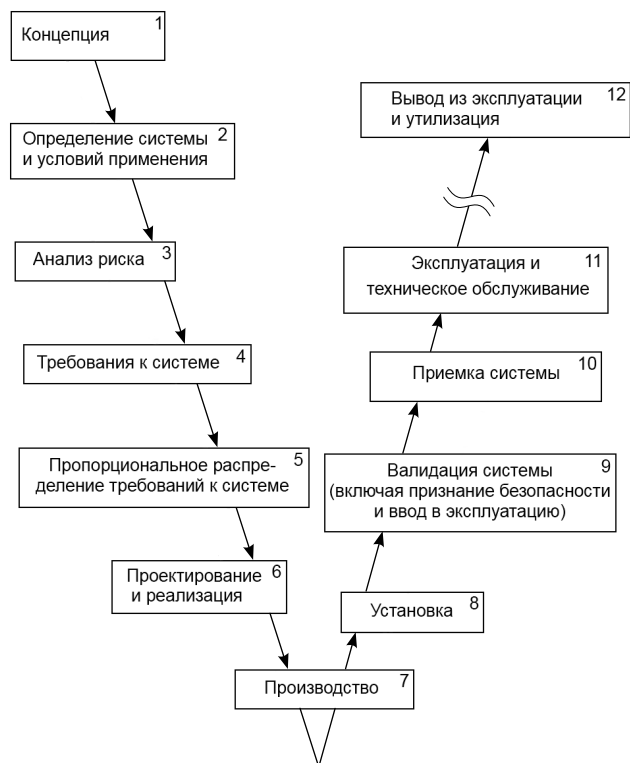


Рис. 1. V-модель в соответствии с EN 50126 [5]

ным системам безопасности, будь то железнодорожные системы, трамваи, метрополитены, электрические системы, системы использующие водород как источник энергии и т.д., как показывает многолетний опыт автора.

2. Задачи, возникающие в связи с новыми технологиями

2.1. Использование водорода для электрического привода

Водород используется в системах транспорта в качестве топлива, заменяя дизельное топливо или бензин или прямое использование электрической энергии. Водород сначала подается в топливный элемент, произведенный электрический ток потом используется в моторах привода.

Водород ведет к нескольким дополнительным опасностям, с которыми необходимо бороться:

- высокое давление;
- химическая реакция с другими веществами (гидрогенизация, которая может привести к разрушению материала) ;
- взрывоопасность;
- удушающее вещество (только в больших концентрациях, взрывчатость становится актуальной раньше, чем удушье).

Эти опасности могут привести к таким несчастным случаям, как взрыв, пожар, сход с рельсов, повреждение транспортного средства вплоть до смертельных происшествий.

Подход, основанный на оценке риска, предусмотренный стандартом CENELEC EN 50126 [5] а также ГОСТ Р МЭК 61508 [4], позволяет справиться с этими опасностями. На третьем этапе жизненного цикла анализ опасностей должен включать эти опасности, вызванные водородом, и следует проанализировать соответственные сценарии аварий, которые могут привести к повреждению материала, пожару, взрыву и т.д.

Затем риск может быть снижен с помощью адекватных мер. Приемлемость риска также может быть доказана с помощью принципа «кодексов практики» из CSM (Common Safety Methods) [7]. Это позволяет также использовать нормативные документы из других областей, если они применимы к данной теме. Это касается, например, правил 134 ООН [8] и приведенных в них стандартов. Это также позволяет повторно использовать компоненты и их сертификаты, которые были разработаны для применения в другой области.

2.2. Гиперлуп

В настоящее время разрабатывается несколько систем гиперлупа. Система гиперлупа – это система магнитной левитации, которая движется в вакуумированной трубе. Поезд с магнитной левитацией не обладает механическим трением на контакте рельса и колеса, однако ат-

мосфера замедляет поезд из-за трения между поездом и окружающим воздухом. Поезда с магнитной левитацией существуют, работают и хорошо изучены, а в МВО (немецкой закон о магнитной левитации) [13] были впервые кодифицированы многие технические решения.

Рис. 2 показывает принцип гиперлупа.

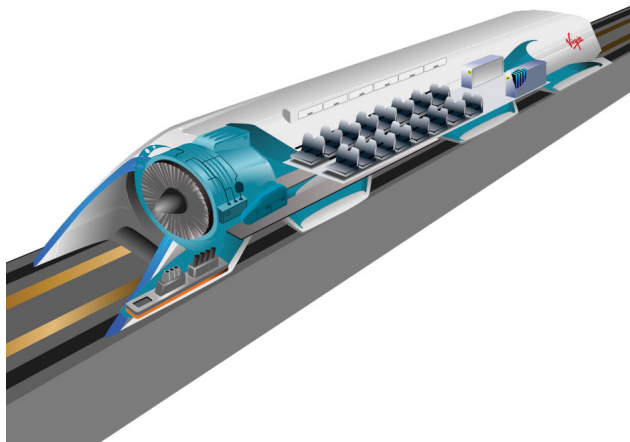


Рис. 2. Гиперлуп – изображение принципа
(Источник: Википедия, лицензия CC BY-SA 4.0)

Использование вакуума или частичного вакуума добавляет опасности к общей ситуации транспортных систем с магнитной левитацией, такие как потеря давления в транспортном средстве гиперлупа, имплозия и т.д. Эти опасности и возникающие сценарии должны быть охвачены анализом опасностей и рисков, который проводится на этапе 3 жизненного цикла. Затем разработка системы, а также оценка безопасности могут быть проведены в соответствии с EN 50126 [5].

Конкретные опасности и соответствующие меры по снижению риска, включая технические решения, могут быть соотнесены с решениями в других областях. Технический отчет [10] был разработан как важный шаг в этом направлении. В нем уже определены системные архитектуры и конкретные технические стандарты, которые могут быть применены для систем гиперлупа.

В настоящее время разрабатываются новые стандарты для систем гиперлупов; по состоянию на конец 2024 года они в основном содержат технические требования к техническим подсистемам, таким как труба и капсула кабины, но не содержат (пока) требований к применению жизненного цикла и требований к процессам. В данном случае жизненный цикл стандарта EN 50126 [5] также может быть использован в качестве основы и соответствующим образом объединен с техническими требованиями новых стандартов для гиперлупа.

2.3. Автоматическое управление поездом

Автоматическое управление движением поездов (АУП) может быть воплощено на различных уровнях, учитывая его роль по отношению к безопасности. Для

метрополитенов это может быть система, не имеющая отношения к безопасности, которая организует управление движением поездов, где автоматическая система управления поездами, т.е. система безопасности, постоянно обеспечивает безопасность движения поездов.

Однако для железных дорог существуют различные разработки, направленные на:

а) поддержку машиниста поезда при энергосберегающем управлении поездом с оптимизацией времени движения. В данном контексте эти системы в основном не связаны с безопасностью, они являются чисто вспомогательными системами;

б) автоматизацию всех или некоторых функций, выполняемых машинистом, замена его техническими системами, которые отвечают требованиям безопасности, поскольку машинист выполняет функцию безопасности.

Случай б) интересен с точки зрения безопасности. В проекте ATORISK, см. Бранд [11], разработаны требования безопасности в виде показателей риска для АУП. Это было сделано в соответствии с существующими нормами EN 50716 [2], EN 50129 [3] и решением CSM [7]. Было проведено тщательное исследование надежности человека на железной дороге, а также анализ рисков в соответствии с DIN VDE V 831-103 [12]. Поэтому для определения требований безопасности для системы, заменяющей машиниста поезда, были использованы два подхода.

Машинист поезда, безусловно, не может быть заменен один к одному. Обычно применяется техническая система и при этом изменяют архитектуру безопасности поезда и, возможно, железнодорожной системы. Кроме того, машинист поезда обычно характеризуется вероятностью отказа по требованию, в то время как технические системы описываются допустимой интенсивностью опасных отказов (TFFR – Tolerable Functional Failure Rate), то есть вероятностью отказа в час. Эти величины необходимо было преобразовать друг в друга. Это преобразование было выполнено с использованием интенсивности требований для вывода допустимой интенсивности опасных отказов (TFFR) из вероятности отказа по требованию. Применяя принципы и методы, описанные в этих стандартах, с помощью различных методов была получена интенсивность опасных отказов (TFFR), которая в основном находится в диапазоне первого уровня полноты безопасности (SIL1), в некоторых случаях даже второго уровня полноты безопасности (SIL2), см. Адебар и Шебе [13].

В работе [14] рассмотрены требования и возможности различных подходов к системам автоматического управления поездом и там различают три возможности.

Первый тип систем – это чисто вспомогательные системы, которые поддерживают машиниста, но не заменяют его.

Вторая категория – это системы, которые непосредственно заменяют машиниста, не затрагивая существующую систему автоматической защиты поезда.

К третьей категории относятся интегрированные системы, т.е. функции машиниста полностью интегрированы в систему защиты локомотива.

Можно ожидать, что и в железнодорожных системах будет происходить развитие, параллельное тому, которое характерно для автомобильного транспорта. В зависимости от имеющихся на рынке технических компонентов можно выбирать различные архитектуры и постепенно заменять машиниста техническими системами, начиная с самых простых ситуаций.

Определение термина уровня полноты безопасности (SIL) можно найти в [12].

2.4. Искусственный интеллект

Автоматизация функций, например, замена машиниста поезда, требует качества восприятия различных источников информации, превышающего возможности многих датчиков. Это приводит не только к использованию комбинаций различных датчиков, но и к усовершенствованным алгоритмам обработки сигналов и распознавания образов, включая искусственный интеллект (ИИ). Однако стандарты, например EN 50716 [2], не поддерживают требования для систем, содержащих ИИ (СИИ), а даже препятствуют его использованию. Это обусловлено тем, что для приложений безопасности поведение системы должно быть всегда предсказуемым в детерминированном смысле. При внедрении искусственного интеллекта поведение системы, содержащей ИИ, предсказуемо только в вероятностном смысле. Причина не в самой системе и программном обеспечении – они всегда будут давать одинаковый ответ при одинаковых входных значениях и при предположении, что для обучения используются одни и те же данные, – а в очень большом количестве возможных входных показаний, которые невозможно проверить. Однако существует подход, позволяющий с помощью существующих стандартов разработать безопасную систему и провести экспертизу ее безопасности для системы, содержащей ИИ, см. Брабанд и Шебе [15, 16]. Конечно, еще не накоплен широкий опыт, как это сделать практически, но основной путь прокладывают существующие стандарты, которые в настоящее время даже расширяются. Наконец, должны быть реализованы меры по борьбе с систематическими ошибками, и необходимо показать, что доля опасных отказов, вызванных СИИ, ниже целевого значения.

Что касается эффективности СИИ для задач восприятия информации, то она должна быть как минимум не хуже, чем профессиональный человек.

Первый существенный результат по обращению с СИИ – это стандарт ISO / PAS 8800 области автомобильной техники [17]. Этот стандарт использует жизненный цикл и выдвигает требования для мер против систематических отказов, в том числе разработана методика для отбора репрезентативной выборки.

Ключевую роль играет обучение СИИ на репрезентативной, релевантной и корректной выборке и проверка качества научения той же системы ИИ на второй, независимой выборке. Эти, казалось бы, простые требования, однако, трудно выполнимы, поскольку для этого требуется множество данных, которые необходимо вручную подготовить и классифицировать. Кроме того, необходимо провести большие исследования, чтобы выборка представляла все возможные ситуации, т.е. чтобы выборка была полной относительно всех возможных ситуаций.

Когда система ИИ должна реализовывать другие задачи, например, принятие решений или выполнение задач классификации, необходимо решить сравнимые проблемы. Кроме того, путь к принятию первой системы, связанной с безопасностью и содержащей ИИ, будет нелегким, поскольку утверждение о «репрезентативности» должно быть доказано.

В работе [18] описывается метод оценки пределов вероятности неправильной классификации. Правильное и эффективное применение СИИ не тривиально, см. работу Шебе и Шубинского [19].

По сути дела, использование СИИ похоже на атаку методом «грубой силы», использующую очень гибкую статистическую модель для решения проблемы. При этом надо помнить, что результата СИИ надо проверить и что при использовании СИИ в системах с функциями безопасности следует вести доказательство безопасности.

Основные подходы к применению систем ИИ:

- СИИ поддерживает разработчика.

При этом подходе СИИ собирает информацию, составляет список литературы и т.д. Таким образом, СИИ поддерживает разработчика, но тот несет полную ответственность за результаты своей работы;

- Выбор математической модели.

ИИ помогает при выборе математической модели. При этом ИИ подсказывает модель, а разработчик проверяет применимость модели и показывает с помощью статистических методов, что модель является подходящей. И в этом случае, полная ответственность лежит на разработчике;

- Анализ данных.

СИИ используется для анализа данных. При этом могут быть выявлены тенденции, связи и т.д. Однако рекомендуется искать закономерности, которые привели к данным. И в этом случае ответственность остается у разработчика.

Данные три случая являются лишь отдельными примерами приложения СИИ. Рекомендуется использовать СИИ в качестве помощника, который проводит рутинную работу, результаты которой проверяются самим разработчиком.

Таким образом, можно избежать объемных доказательств корректности работы СИИ или даже доказательства безопасности, если СИИ использовалась бы в системах с функциями безопасности. Во всяком случае,

использование СИИ не должно привести к пренебрежению естественным интеллектом.

2.5. Кибербезопасность

Проект нового стандарта кибербезопасности для железнодорожных приложений CLC / TS 50701 [20] описывает, как существующие технические стандарты по кибербезопасности могут быть применены для железнодорожных систем. Таким образом, этот стандарт адаптирует известные отраслевые стандарты к железнодорожным системам. EN 50129 [3] требует, чтобы системы, связанные с безопасностью, также подвергались требованиям кибербезопасности. С одной стороны, согласно требованиям кибербезопасности, патч должен быть применен как можно скорее, когда известно об уязвимости. С другой стороны, изменение программного обеспечения, связанного с безопасностью, требует новой оценки и утверждения безопасности, что занимает время. Первое решение – просто разделить функции безопасности и кибербезопасности, как было предложено Бокком и другими [21]. Позже другие архитектурные решения были предложены Брабандом и Шебе [22]. Решение заключается в выборе такой архитектуры безопасности, которая устойчива к изменениям в программном обеспечении, требуемым кибербезопасностью. Разумеется, это должно быть показано в доказательстве безопасности, а функции безопасности и кибербезопасности должны быть разделены.

Заключение

Общий метод, описанный в стандартах CENELEC [2, 3, 5] и также в ГОСТ Р МЭК 61508 [4], может быть применен и к новым технологиям:

- утверждение и применение жизненного цикла;
- прохождение жизненного цикла путем выявления опасностей, оценки рисков и снижения рисков до приемлемого уровня;
- выбор методов снижения риска в соответствии с принципами принятия риска согласно [5] и CSM [7]: кодексы практики включающие и стандарты, применение сравнимой и уже допущенной системы, явный анализ риска;
- определение требований безопасности на основе результатов анализа опасностей и рисков (определение приемлемого уровня риска) включая требования безопасности и функциональные требования из надлежащих стандартов для примененной специфической технологии.

Применение этого подхода позволило получить хорошо зарекомендовавшую себя оценку всех этих систем. Применение стандартов CENELEC [2, 3, 5] и также ГОСТ Р МЭК 61508 [4], заложило основу для проведения оценки безопасности на основе этих же стандартов. Общий характер стандартов CENELEC позволяет использовать их и для новых технологий.

Список литературы

1. Пахл Й. Принципы сигнализации железных дорог, Брауншвейг 2021, CC BY-NC-ND 4.0.
2. EN 50716: Railway Applications – Requirements for software development, 2023.
3. EN 50129: Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling, 2018.
4. ГОСТ Р МЭК 61508 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных связанных с безопасностью: части 1–7. М.: Стандартинформ, 2014.
5. EN 50126: Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS Process, 2017.
6. Шебе Х. Верифицирование и оценка в железных дорогах. // Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference, Research Publishing, Singapore, 2019. Pp. 1685-1690.
7. CSM – COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2015/1136 of 13 July 2015 amending Implementing Regulation (EU) No 402/2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment, 2015/
8. ECE/TRANS/WP.29/2014/78, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety related performance of hydrogen-fuelled vehicles.
9. MBO – Magnetschwebbahnverordnung, Bundesgesetzblatt 1997, Teil 1, Nr. 64, 25.9.1997.
10. Hyperloop systems – Standards Inventory and Roadmap Technical report TP CEN/CLC/TR 17912:2023.
11. Брабанд Й. Подход к анализу рисков для автоматизированного движения поездов // Signalling and Datacommunication. 2021. October. Vol. 113. Pp. 25-34.
12. DIN VDE V 0831-103: Elektrische Bahnsignalanlagen – Teil 103: Ermittlung von Sicherheitsanforderungen an technische Funktionen in der Eisenbahnsignaltechnik, 2020.
13. Адебар Ф., Шебе Х. Вероятность человеческих ошибок и интенсивности отказов технических систем автоматизированного движения поездов // Signalling and Datacommunication. 2023. March. Pp. 21-29.
14. Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Различные подходы к автономному вождению для железных дорог // Надежность. 2025. Т. 25. № 1. С. 4-10.
15. Брабанд Й, Шебе Х. Применение искусственного интеллекта в железнодорожной технике для безопасных приложений – возможности и проблемы // Signalling and Datacommunication. 2022. May. Vol. 114. Pp. 14-21.
16. Брабанд Й, Шебе Х. Оценка безопасности искусственного интеллекта // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 25-34.
17. ISO / PAS 8800 Road Vehicles: Safety and Artificial Intelligence, 2024.

18. Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Оценки пределов вероятности неправильной классификации на примере прогнозирования опасных отказов // Надежность. 2024. Т. 24. № 3. С. 18-23.

19. Шебе Х., Шубинский И.Б. Как правильно использовать системы с искусственным интеллектом // RT&A. 2024. Vol. 19. No 4(80). Pp. 31-25.

20. CLC / TS 50701 VDE V 0115-701:2022-11, Railway Application – Cybersecurity Bahnanwendungen IT-Sicherheit: 2022-10-14.

21. Бокк Х.-Х., Брабанд Й., Милиус Б. и др. Направление к профилю охраны кибербезопасности для безопасных приложений в автоматизации железных дорог, Lecture Notes in Computer Science, 2012, Volume 7612, Computer Safety, Reliability, and Security, Pages 137-148.

22. Брабанд Й., Шебе Х. Безопасность по сравнению с кибербезопасностью – почему разница лежит в архитектуре // RT&A. 2021. Vol. 16. No 4(65). Pp. 88-93. DOI: 10.24412/1932-2321-2021-465-88-93

References

1. Pacht J. Railway Signalling Principles. Braunschweig; 2021. CC BY-NC-ND 4.0.

2. EN 50716: Railway Applications – Requirements for software development; 2023.

3. EN 50129: Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling; 2018.

4. IEC 61508 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, Parts 1 – 7, 2010.

5. EN 50126: Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS Process, 2017.

6. Schäbe, H., Verification and Assessment in Railway Safety. In: Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference, Research Publishing. Singapore; 2019. Pp. 1685-1690.

7. CSM – COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2015/1136 of 13 July 2015 amending Implementing Regulation (EU) No 402/2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment; 2015.

8. ECE/TRANS/WP.29/2014/78, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety related performance of hydrogen-fuelled vehicles.

9. MBO – Magnetschwebbahnverordnung, Bundesgesetzblatt 1997, Teil 1, Nr. 64, 25.9.1997.

10. Hyperloop systems – Standards Inventory and Roadmap Technical report TP CEN/CLC/TR 17912:2023.

11. Braband J. Approach for a Risk Analysis for Automated Train Operation, Signalling and Datacommunication (113) 10/2021, 25-34.

12. DIN VDE V 0831-103: Elektrische Bahnsignalanlagen – Teil 103: Ermittlung von Sicherheitsanforderungen an technische Funktionen in der Eisenbahnsignaltechnik, 2020.

13. Adebahr F., Schäbe H. Probability of human error and failure rates of technical ATO systems, Signalling and Datacommunication, 3/2023. Pp. 21-29.

14. Schäbe H., Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. Various approaches to autonomous driving in railways. *Dependability* 2025;25(1):4-10. (In Russ.)

15. Braband J., Schäbe H. The application of artificial intelligence in railway technology for safety-relevant applications – opportunities and problems. *Signalling and Datacommunication* 2022;5(114):14-21.

16. Braband J., Schäbe H. On safety assessment of artificial intelligence. *Dependability* 2020;20(4):25-34.

17. ISO / PAS 8800 Road Vehicles: Safety and Artificial Intelligence; 2024.

18. Schäbe H., Shubinski I.B., Rozenberg E.N. Evaluating the limits of misclassification probability. Case study of hazardous failure prediction. *Dependability* 2024;24(3):18-23. (In Russ.)

19. Schäbe H., Shubinski I.B. How to Properly Apply Systems of Artificial Intelligence. *RT&A* 2024; 4(80):31-25.

20. CLC/TS 50701 VDE V 0115-701:2022-11, Railway Application – Cybersecurity Bahnanwendungen IT-Sicherheit: 2022-10-14.

21. Bock H-H., Braband J., Milius B., Schäbe H. Towards an IT Security Protection Profile for Safety-Related Communication in Railway Automation. *Lecture Notes in Computer Science. Computer Safety, Reliability, and Security* 2012;7612:137-148.

22. Braband J., Schäbe H. Safety vs. Security – Why Architecture makes the Difference. *RT&A* 2021;4(65):88-93. DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2021-465-88-93>.

Сведения об авторе

Шебе Хендрик – доктор естественных наук, независимый эксперт, Кельн, Германия, e-mail: dr.hendrik.schaebe@gmail.com

About the author

Hendrik Schäbe, Doctor of natural sciences, Independent Expert, Cologne, Germany, e-mail: dr.hendrik.schaebe@gmail.com.

Вклад автора в статью

Шебе Х. использовал свой материал прежних работ и дополнил некоторыми соображениями.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Об отказобезопасности критически важных систем высокоскоростного движения

On the fail-safety of critical systems in high-speed rail

Гапанович В.А.¹, Шубинский И.Б.^{2*}
Gapanovich V.A.¹, Shubinsky I.B.^{2*}

¹ Ассоциация «Объединение производителей железнодорожной техники» (ОПЖТ), Москва, Россия

² АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация

¹ Association "Union of Industries of Railway Equipment" (UIRE), Moscow, Russia

² Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), Moscow, Russian Federation

* igor-shubinsky@yandex.ru



Гапанович В.А.



Шубинский И.Б.

Резюме. Цель. Установить приемлемые архитектуры отказобезопасности критически важных систем высокоскоростного движения, определить их возможности и ограничения. **Методы.** Построение и исследование ряда математических моделей надежности и функциональной безопасности систем. Выбор приемлемых архитектур отказобезопасности критически важных систем высокоскоростного движения. **Результаты.** Анализ надежности широко распространенной на практике архитектуры безопасности 2oo3 аналитически и численно показал, что с помощью мажоритарной логики удастся существенно повысить достоверность результатов (среднее время до функционального отказа мажоритарной системы в 2 раза превышает этот показатель в исходном объекте). Вместе с тем, безотказность системы, а, следовательно, ее отказобезопасность, ниже, чем у исходного объекта. Поэтому такая архитектура приемлема не выше уровня SIL3. Возможно для обеспечения этого уровня отказобезопасности предпочтение отдавать альтернативной архитектуре (1oo2)P вследствие отсутствия в ней восстанавливающих органов и переключающих устройств. Она формируется из двух параллельно работающих компонент, каждая из которых построена по схеме постоянного дублирования. Однако при этом не следует забывать, что в такой системе сохраняется риск ложного срабатывания. Показано, что для обеспечения отказобезопасности на уровне SIL4 можно применять гибридные мажоритарные архитектуры (2oo3)P или 2oo4. Вместе с тем следует учитывать, что существенную часть мажоритарных структур отказобезопасности критически важных систем составляют переключаемые схемы, обеспечивающие отключение отказавших и включение резервных компонент. Это обстоятельство отрицательно сказывается на эффективности мажоритарного резервирования, поскольку связано с применением дополнительных средств и процедур. Причина этого недостатка состоит в том, что и при аппаратной, и при программной организации механизм маскирования сбоев, т.е. голосование, определение неисправного канала, его блокирование и последующее включение в нормальную работу, используется в каждом такте работы системы вне зависимости от наличия или отсутствия сбоев. Эти временные потери при практической реализации достигают 30-50%. К недостаткам мажоритарования при его реализации следует отнести также большое количество связей между каналами и определенные трудности при проектировании. Указанные ограничения оказывают негативное, но не определяющее влияние на выбор приемлемой архитектуры отказобезопасности. Их следует учитывать для каждого конкретного объекта и условий его применения

Abstract. Aim. To identify acceptable fail-safety architectures for critical high-speed rail systems, as well as their capabilities and limitations. **Methods.** Construction and study of several mathematical models of system dependability and functional safety. Selection of acceptable fail-safety architectures for critical high-speed rail systems. **Results.** An analytical and numerical analysis of the dependability of the widely used 2oo3 safety architecture has shown that majority logic can significantly improve the reliability of the results (mean time to functional failure of a majority system is twice that of the original object). However, the system's dependability, and, consequently, its fail-safety, is lower than that of the original object. Therefore, such an architecture is not acceptable beyond SIL3. For the purpose of ensuring this level of fail-safety, the alternative (1oo2)P architecture may prove to be preferable as it lacks restoring organs and switching devices. It is made of two components that operate in parallel, each of which uses a hot standby setup. However, one should not forget that such systems are prone to false alarms. It has been shown that hybrid majority architectures (2oo3)P or

2004 can provide SIL4 fail-safety. However, it should be noted that a significant portion of the majority setups that ensure fail-safety of critical systems are switching circuits designed for disconnecting failed components and activating backup components. This circumstance affects the effectiveness of majority redundancy, as it requires the use of additional tools and procedures. This shortcoming is due to the fact that in both hardware and software implementations, the fault masking mechanism, i.e., voting, faulty channel identification, blocking thereof, and then resuming normal operation, is repeated in every system cycle, regardless of the presence or absence of faults. Practically, the associated time losses are as high as 30 to 50%. The disadvantages of majority redundancy also include the large number of connections between channels and certain design difficulties. These limitations have a negative, but not decisive, effect on the selection of an acceptable fail-safety architecture. They should be taken into account given each specific object and its operating conditions.

Ключевые слова. Киберфизическая система, отказобезопасность, безотказность, функциональная надежность, архитектура отказобезопасности, мажоритарная логика система с гибридной мажоритарной логикой

Keywords: Cyber-physical system, fail-safety, reliability, functional dependability, fail-safety architecture, majority logic, hybrid majority logic system

Для цитирования: Гапанович В.А., Шубинский И.Б. Об отказобезопасности критически важных систем высокоскоростного движения // Надежность. 2026. №2. С. 9-16. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-9-16>

For citation: Gapanovich V.A., Shubinsky I.B. On the fail-safety of critical systems in high-speed rail. *Dependability* 2026;2: 9-16. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-9-16>

Поступила: 03.01.2025 / **После доработки:** 15.01.2026 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 03.01.2025 / **Revised on:** 15.01.2026 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Для выполнения функций безопасности на железнодорожном транспорте в течение многих лет используются системы, состоящие из электрических и/или электронных элементов.

В критически важных системах высокоскоростного движения безопасность достигается в большинстве своем за счет использования нескольких составных устройств и даже систем, в которых применяются различные технологии (например, механические, гидравлические, пневматические, электрические, электронные, программируемые электронные). Так, например, локомотив состоит из множества взаимосвязанных между собой систем, содержащих, в том числе, критически важные системы, непосредственно обеспечивающие безопасность движения. К ним можно отнести: локомотивные приборы безопасности; системы автоматического пожаротушения и системы обнаружения возгораний; электронную (программируемую) часть управления тормозами. В мотор-вагонном подвижном составе в состав критически важных систем можно отнести также системы управления внешними и внутренними дверьми.

Любая стратегия безопасности должна, следовательно, учитывать не только все элементы, входящие в состав отдельных систем (например, датчики, управляющие устройства и исполнительные механизмы), но также и все подсистемы безопасности, входящие в состав общей системы обеспечения безопасности. Таким образом, для критически важных систем высокоскоростного движения недостаточно ограничиваться задачами анализа и синтеза отдельных функций безопасности – необходимо

комплексно решать задачи безопасности на системном уровне. При этом следует руководствоваться основными документами Международной электротехнической комиссии в области внедрения системного управления RAMS в железнодорожной отрасли IEC 62278-1 и IEC 62278-2 и особенно Техническими отчетами IEC 62278-3:2025 и 62278-4:2025. В дополнение к стандарту IEC 62278 Техническим комитетом МЭК ТК 9 выпущен Технический отчет [1]. Эта часть IEC 62278 содержит указания по применению требований RAM в частности к подвижному составу и проведению мероприятий RAM в течение стадий жизненного цикла системы от приглашения к участию в тендере до демонстрации на стадии эксплуатации.

Необходимо отметить одно важное изменение в обновленной редакции IEC 62278-1:2025 [2]. В определении введен конкретный объект стандартизации «Физическое устройство». Из этого следует, что требования функциональной безопасности [3] применимо и для киберфизических систем, а не только к программному обеспечению и архитектуре логических контроллеров микропроцессорных систем управления. Это обстоятельство позволяет с точки зрения функциональной безопасности рассматривать критически важные системы высокоскоростного движения как киберфизические системы [4], содержащие (рис. 1):

- вычислительную компоненту в составе с прикладной логикой, прикладной вычислительной платформой и системной вычислительной платформой;
- прикладную компоненту с целевыми физическими объектами и процессами;
- датчики и исполнительные устройства.



Рис. 1. Структурная модель киберфизических критически важных систем

1. Архитектуры отказобезопасности критически важных систем

Под безопасностью понимается отсутствие недопустимого риска или способность предмета, явления или процесса сохраняться при разрушающих воздействиях, или свойство критически важных систем сохранять свои параметры при воздействии опасностей, или способность системы функционировать, не переходя в опасное состояние и т.д. [5]. Все эти определения по существу сводятся к двум ключевым положениям: 1) при воздействии опасности система должна сохранять свои свойства и функционировать без происшествий; 2) риск опасного воздействия самой системы на окружающую среду не должен превышать допустимый уровень. Здесь под опасностью понимается угроза неблагоприятного (негативного) воздействия чего-либо на систему.

В зависимости от последствий можно отдельно рассматривать (рис. 2):

а) функциональную надежность системы, если она выполняет свою функцию (т.е. не теряет определенных свойств) в цепочке всех тех систем, которые участвуют в функции;

б) функциональную безопасност, если последствия не сведут к неприемлемым рискам.

Нарушения безопасности критически важной системы высокоскоростного движения вызваны событиями нарушений функционирования или эксплуатации самой системы. Существенными угрозами нарушения безопасности являются также информационные атаки и недеklarированные возможности [6]. Отсюда следует, что *отказобезопасность* – способность системы сохранять безопасное состояние в случае реализации угроз, связанных с нарушениями функционирования или эксплуатацией самой системы, а также с информационными атаками и недеklarированными возможностями, и сохранять режим работы, не представляющий опасности для людей, окружающей среды или имущества.

Возможные архитектуры отказобезопасности критически важных систем относительно их уровней полноты безопасности (SIL) и практические примеры в системах управления показаны в табл. 1.

Коэффициент диагностического покрытия (Diagnostic Coverage, DC) – это количественный показатель в стандартах функциональной безопасности (IEC 61508), который показывает, какую долю опасных отказов компонента или системы способна обнаружить встроенная диагностика. Рекомендуемый минимальный DC (для аппаратных средств) $SIL2 \geq 90\%$. Для уровня $SIL3$ $DC \geq 99\%$, предполагается периодическое тестирование

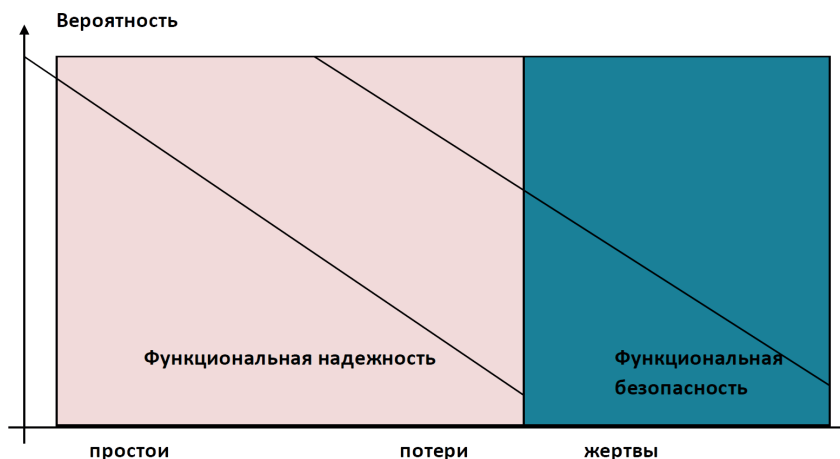


Рис. 2. Функциональная надежность и функциональная безопасность

Табл. 1. Архитектуры отказобезопасности критически важных систем

| Целевой уровень SIL | Типовая архитектура (сокращение) | Описание и логика работы | Практический пример в системе управления |
|---------------------|---------------------------------------|--|--|
| SIL 1 | 1oo1 (1 out of 1) | Одиночный канал. Без резервирования. Высокие требования к качеству компонентов и диагностике. | Простой датчик или привод с высокой собственной надежностью, где отказ маловероятен, а последствия минимальны. |
| SIL 2 | 1oo1D (1 out of 1 with Diagnostics) | Одиночный канал, но с расширенной внутренней диагностикой (DC ≥ 90%). Диагностика обнаруживает большинство отказов и переводит систему в безопасное состояние. | Контроллер с функцией самопроверки памяти, процессора и цепей ввода/вывода. При обнаружении сбоя инициируется аварийная остановка. |
| SIL 2 / SIL 3 | 1oo2 (1 out of 2) | Два параллельных канала. Система срабатывает, если сработал хотя бы один канал. Высокая доступность, но есть риск ложного срабатывания. | Два независимых датчика давления. Если один показывает опасное значение — система останавливается. Используется, когда ложная остановка менее критична, чем пропуск опасности. |
| SIL 3 / SIL 4 | 2oo3 (2 out of 3) | Три параллельных канала. Система срабатывает, если сработали как минимум два канала. Оптимальный баланс: отказоустойчивость (один канал может отказать) + защита от ложных срабатываний. | "Золотой стандарт" для критических систем. Три процессорных модуля в системе управления движением поезда. Решение принимается по большинству, что исключает остановку из-за сбоя в одном модуле. |
| SIL 4 | 2oo4 (2 out of 4) и другие комбинации | Высшая степень резервирования и отказоустойчивости. Может включать несколько уровней резервирования (аппаратное, временное, функциональное). | Критические системы на АЭС или системы автоматического торможения поездов (например, ETCS Level 2). Часто сочетает дублированные контроллеры, работающие по схеме 2oo4, с независимыми цепями питания и датчиками. |

оперативной памяти, контроль временных циклов, диагностика целостности программы

Основой для выбора полноты безопасности SIL является требование снижения риска до приемлемого уровня. Допустимый (приемлемый) уровень для пассажирского транспорта определяется как вероятность тяжелого или смертельного травмирования не более 10^{-6} в год (один случай на миллион лет в эксплуатации).

Уровень диагностического покрытия напрямую влияет на основные параметры системы:

- снижение вероятности опасного отказа
- повышение достигнутого уровня полноты безопасности SIL.

Для уровня SIL4 применяются все те же методы, что и для SIL3. Дополнительно реализуется полное аппаратное дублирование с постоянным сравнением выходов двух каналов, а также самодиагностика процессорного ядра, тестирование системы данных, контроль напряжения питания, избыточное вычисление со сравнениями.

Оценим достоинства и недостатки основных приведенных в табл. 1 архитектур отказобезопасности систем.

Архитектура 1oo1 (SIL1) – простота и низкая стоимость. Однако низкая отказоустойчивость – отказ единственного канала ведет к отказу всей функции безопасности.

Архитектура 1oo2 (SIL2/3) – высокая вероятность корректного срабатывания. Однако повышенная вероятность ложного срабатывания, что может приводить к незапланированным остановкам.

Архитектура 2oo3 (SIL3/4) – снижает вероятность ложного срабатывания. Однако относительно возможной обеспечения надежности и безопасности требует дополнительного изучения (см. раздел 2).

Архитектура 2oo4 (SIL4) – высокая надежность и отказобезопасность. Позволяет системе продолжать безопасную работу при отказе двух каналов в определенных конфигурациях.

Ложные срабатывания систем управления существенно ограничивают возможности высокоскоростного движения поездов. Высокий уровень отказобезопасности и низкая вероятность ложного срабатывания являются ключевыми требованиями к критически важным системам высокоскоростного движения поездов. Этим условиям отвечает архитектура 2oo4 (SIL4) и в определенной мере архитектура 2oo3 (SIL3/4).

2. Отказобезопасность мажоритарной архитектуры 2oo3

Мажоритарной называется система выборов, при которой в число избранных попадают лишь кандидаты партии, получившей большинство голосов в данном округе. Этот подход применяется и в технике для повышения надежности ответственных объектов. Так, в критически важных системах широко применяется трехкратная структурная избыточность объектов в сочетании с восстанавливающим органом (ВО). На этой основе создается троированный мажоритарный объект (ТМО) с ВО, который определяет выходные результаты по *большинству голосов (мажоритарным методом)*. В результате реализуется логика 2/3 (совпадение хотя – бы двух выходных результатов из трех при трех параллельно работающих однотипных устройствах). В этом случае при условии идеальной надежности восстанавливающего органа вероятность безотказной работы и вероятность отказа ТМО соответственно равны:

$$P_{TMC}(t) = P^3(t) + 3P^2(t)G(t);$$

$$G_{TMC}(t) = 3P(t)G^2(t) + G^3(t),$$

где $P(t)$ и $G(t)$ – вероятности безотказной работы и вероятности отказа любого одного из трех параллельно работающих устройств.

В общем случае резервирования с логикой n/m , когда $n \geq 2$ и $n < m$ вероятность безотказной работы N – го мажоритарного объекта (NMO) имеет следующий вид:

$$P_{NMO}(t) = P^m(t) + \binom{m}{1} P^{m-1}(t)G(t) + \binom{m}{2} P^{m-2}(t)G^2(t) + \dots + \binom{m}{i} P^{m-i}(t)G^i(t) + \dots + \binom{m}{n} P^n(t)G^{m-n}(t) = \sum_{i=0}^n \binom{m}{i} P^{m-i}(t)G^i(t) \quad (1)$$

При экспоненциальном законе распределения отказов с интенсивностью λ показатели безотказности ТМО имеют вид:

$$P_{TMC}(t) = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t};$$

$$\lambda_{TMC}(t) = \frac{6\lambda(1 - e^{-\lambda t})}{3 - 2e^{-\lambda t}}; T_{TMC} = \frac{5}{6\lambda}.$$

Приведенные выше значения показателей надежности мажоритарного объекта показывают, что мажоритарное резервирование может снизить его безотказность по отношению к исходному нерезервированному объекту. Вместе с тем, предполагается, что этот вид резервирования повышает достоверность передаваемой информации и, следовательно, повышает функциональную надежность исходного объекта. Убедимся в этом.

ВО может реализоваться аппаратно или программно. Как правило, предпочтение отдается программному варианту реализации ВО, как более дешевому и гибкому варианту построения мажоритарного объекта. Вследствие простоты логики построения программы ВО есть возможность практически исключить алгоритмические и программные ошибки. Вследствие этого у некоторых специалистов создается иллюзия абсолютной надежности ВО. При этом упускается из виду то очень существенное обстоятельство, что функциональная надежность ВО и мажоритарного объекта в целом определяется не только ошибками в программе, но, главным образом, сбойными ошибками, которые возникают значительно чаще отказов аппаратуры и могут существенно понизить эффективность мажоритарного резервирования.

По существу восстанавливающий орган представляет собой для мажоритарной логики 2/3 программно реализованную структуру, показанную на рис.3

С помощью микроопераций $\wedge_1, \wedge_2, \wedge_3$ производится поразрядное сравнение выходных результатов работы цифровых однотипных устройств 1, 2 и 3. Количество бит в выходном результате обычно колеблется в пределах от 8 до 128. Эти цифры показывают число сравнений, которое нужно однократно выполнить каждой из трех микроопераций. В результате сравнений формируются 3 одиночных сигнала $X_i (i = 1, 2, 3)$, каждый из которых представляет собой код 1 или 0.

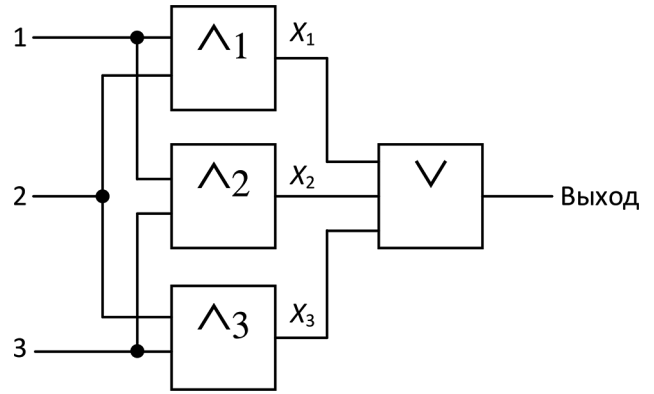


Рис. 3. Мажоритарная логика 2/3

Построим модель надежности мажоритарного объекта с восстанавливающим органом с логикой 2/3 в предположении, что микрооперации сравнения результатов работы цифровых однотипных устройств находятся под воздействием сбойных ошибок аппаратуры объекта и выполняются с вероятностью правильной однократной работы p . При этом для оценки сверху принимается, что алгоритмические и программные ошибки в микрооперациях отсутствуют и микрооперация дизъюнкции (рис. 3) также выполняется безошибочно вследствие большой избыточности по кодам 1 [7].

Вероятность функционального отказа мажоритарного объекта в момент времени $t, i = 0, 1, 2, \dots$, определяется суммой вероятностей следующих событий:

- $G(A) = G^3(t) + 3G^2(t)P(t)$ – вероятность того, что все три устройства отказали или отказали два любых из трех устройств (при этом состояние надежности восстанавливающего органа не оказывает влияния);

- $G(B) = P^3(t)(g^3 + 3g^2p)$ – вероятность того, что исправны все три устройства, но неправильно выполнены все три микрооперации восстанавливающего органа, или хотя бы две микрооперации из трех;

- $G(B) = 3P^2(t)G(t)(g^3 + 3g^2p + 3gp^2)$ – вероятность того, что при условии исправности двух любых из трех устройств неправильно выполнены либо все три микрооперации или две из трех или хотя бы одна из трех.

Вероятность отсутствия функционального отказа в работе мажоритарного объекта в момент времени t , равна:

$$P_{MO}(t) = 1 - G(A) - G(B) - G(B) = P^2(t)[1 - g^2(1 + 2p) + G(t)p^2(2p - 3g)].$$

Здесь подразумевается, что разность между соседними моментами времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ есть такт обработки информации в системе.

Следовательно, вероятность функционального отказа в течение такта однократной обработки информации равна:

$$P_{MO}(\Delta t) = P^2(\Delta t)[1 - g^2(1 + 2p) + G(\Delta t)p^2(2p - 3g)]. \quad (2)$$

Функция распределения времени до функционального отказа с учетом геометрического распределения ошибок в выполнении микроопераций восстанавливающего органа [7] имеет следующий вид: $F(n) = 1 - P_{MO}^n$. При этом математическое ожидание времени до функционального отказа мажоритарного объекта определяется в виде:

$$T_{MO\Phi} = \frac{\Delta t}{1 - P_{MO}(\Delta t)}. \quad (3)$$

Учитывая, что геометрическое распределение есть дискретный аналог экспоненциального распределения, можно выразить интенсивность функциональных отказов мажоритарного объекта через величину, обратную средней наработке до его функционального отказа:

$$\lambda_{MO\Phi} = \frac{1 - P_{MO}(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{1 - P^2(\Delta t)[1 - g^2(1 + 2p) + G(\Delta t)p^2(2p - 3g)]}{\Delta t}.$$

Для сравнения определим показатели функциональной надежности исходного объекта (цифрового устройства системы) без резерва, имея в виду, что результат работы устройства представляет собой массив информации, который считывается в каждом такте обработки информации. Вероятность безотказной работы устройства в течение длительности такта равна $P(\Delta t)$. Вероятность правильного однократного считывания массива информации определяем в виде $p_1 = p^{1/3}$. Эта связь с показателем правильного однократного выполнения микрооперации объясняется тем, что при выполнении микрооперации считываются массивы информации с двух устройств, после чего эти массивы сравниваются между собой. В результате при выполнении микрооперации выполняются три примерно равных действия считывания массива информации.

Отсюда вероятность функционального отказа в течение такта однократной обработки информации нерезервированным объектом равна $P_O(\Delta t) = P(\Delta t)p^{1/3}$. Другие два показателя функциональной безотказности имеют следующий вид:

$$T_{O\Phi} = \frac{\Delta t}{1 - P(\Delta t)p^{1/3}}; \lambda_{O\Phi} = \frac{1 - P(\Delta t)p^{1/3}}{\Delta t}. \quad (4)$$

Рассмотрим пример.

Пример 1. Время такта обработки информации $\Delta t = 10^{-6}$ с. Показатели правильного однократного выполнения микрооперации сравнения результатов работы цифровых однотипных компонент находятся на уровне правильной однократной работы большой интегральной схемы и составляют согласно [7] $p = 1 - 5 \times 10^{-13}$; $g = 5 \times 10^{-13}$. Отказы составных компонентов обработки информации распределены по экспоненциальному закону с интенсивностью $\lambda = 10^{-6}$ 1/ч = $0,3 \times 10^{-9}$ 1/с. Требуется вычислить показатели функциональной безотказности

мажоритарного объекта и объекта без резерва и сравнить эти результаты.

Решение. Вначале определяют вероятности безотказной работы и вероятности отказа исходного объекта в течение такта обработки информации:

$$P(\Delta t) = \exp(-\lambda \Delta t) = 1 - 0,3 \cdot 10^{-15} \text{ 1/с};$$

$$G(\Delta t) = 1 - \exp(-\lambda \Delta t) = 0,3 \cdot 10^{-15} \text{ 1/с}.$$

По формуле (2) находят вероятность правильной однократной работы мажоритарного объекта $P_{MO}(\Delta t) \approx 1 - 1,2 \times 10^{-15}$. Затем по формуле (3) определяют среднюю наработку до функционального отказа, а затем и интенсивность функциональных отказов мажоритарного объекта:

$$T_{MO\Phi} = 8 \cdot 10^8 \text{ с} = 2 \cdot 10^5 \text{ ч}; \lambda_{MO\Phi} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

По формуле (4) определяют среднюю наработку до функционального отказа, а затем и интенсивность функциональных отказов исходного нерезервированного объекта:

$$P_O(\Delta t) \approx 1 - 3,2 \cdot 10^{-15};$$

$$T_{O\Phi} = 3,12 \cdot 10^8 \text{ с} = 0,87 \cdot 10^5 \text{ ч}; \lambda_{O\Phi} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

Полученные результаты убедительно подтверждают справедливость высказанного ранее тезиса о том, мажоритарное резервирование с логикой 2/3 снижает структурную надежность (показатель средней наработки до структурного отказа $T_O = 1/\lambda$ исходного объекта снижается до значения $T_{MO} = 5/6\lambda$ у мажоритарного объекта). Однако большое достоинство мажоритарного резервирования в том, что оно существенно повышает функциональную надежность объекта (показатель средней наработки до функционального отказа мажоритарного объекта более чем в два раза превышает тот же показатель исходного нерезервированного объекта, т.е. $T_{MO\Phi} / T_{O\Phi} > 2$).

При низкой вероятности правильного выполнения микроопераций сравнения результатов работы компонент ($p \rightarrow 0$) функциональная надежность мажоритарного объекта ничтожно мала ($P_{MO}(\Delta t) \rightarrow 0$) даже при высокой вероятности безотказной работы составных однотипных компонент объекта ($P(\Delta t) \rightarrow 1$). Отсюда следует, что для обеспечения функциональной надежности мажоритарного объекта необходимо построить высоконадежный восстанавливающий орган.

3. Отказобезопасность систем с гибридными мажоритарными архитектурами

Недостаток мажоритарного резервирования заключается в нарушении алгоритма при отказе двух

из трех компонент (для троичной мажоритарной схемы), а в общем случае при отказе $n + 1$ компонент (для n -ированного мажоритарного объекта в системе). При нечетном числе компонент $N = 2n + 1$ объект еще сохраняет работоспособность при отказе n компонент; если же откажет еще хотя бы одна компонента, то объект теряет свои функциональные возможности, хотя имеется n исправных компонент. Для устранения этого существенного недостатка вводится в состав системы минимальная дополнительная избыточность.

Рассмотрим возможную архитектуру построения критически важной системы с гибридным мажоритарным резервированием.

Архитектура (2003)P (для SIL3/4). Гибридное мажоритарное резервирование основывается на введении в состав мажоритарного объекта дополнительной однотипной резервной компоненты. Эта компонента не подключена к восстанавливающему органу. Она предназначена для замещения отказавших компонент из состава исходного мажоритарного объекта. Показатели структурной надежности данного объекта определяются на основании его критерия отказа, который определяется так. При трех основных и одном резервном однотипном компоненте обработки информации структурный отказ объекта наступает при наличии двух отказавших компонент или при наличии одного исправного основного компонента и также исправного резервного компонента, но подключение резервного вместо отказавшего основного компонента не было успешным (либо по причине пропуска отказа, либо по причине отказа переключающего устройства, либо из-за несвоевременного переключения на резерв).

Вероятность безотказной работы резервированных компонент троичного гибридного мажоритарного объекта может быть определена по формуле:

$$P_{(2003)P}(t) = P^3(t) + 3P^2(t) \cdot g(t) \cdot [1 + g(t) \cdot \gamma],$$

где γ – вероятность успешного переключения на резерв.

При экспоненциальном законе распределения отказов компоненты средняя наработка до отказа системы [8]:

$$T_{(2003)P} = \int_0^{\infty} P_{(2003)P}(t) dt = \frac{10 + 3\gamma}{12\lambda}.$$

При успешных переходах на резерв ($\gamma \rightarrow 1$) средняя наработка до структурного отказа объекта может быть повышена до 30%. Действительно, при этих условиях

$$T_{(2003)P} = \frac{13}{12\lambda} \text{ и } T_{(2003)P} / T_{2003} = 1,3.$$

Архитектура 2004 (для SIL4, см. табл. 1) основывается на применении адаптивных ВО, которые изменяют свой порог по мере выхода компонент из строя. Например, при использовании мажоритарного резервирования с логикой 3/4 в случае отказа компоненты производится переход на логику 2/3.

Вероятность безопасной работы системы с этой архитектурой безопасности:

$$P_{2004}(t) = P^4(t) + 4P^3(t)G(t) + 6P^2(t)G^2(t).$$

При экспоненциальном законе распределения отказов компоненты критически важной системы средняя наработка до отказа системы:

$$T_{2004} = \int_0^{\infty} P_{2004}(t) dt = \frac{13}{12\lambda}.$$

Таким образом, архитектуры отказобезопасности с избыточностью типа **(2003)P** и **2004** обеспечивают практически одинаковый уровень средней наработки до отказа системы.

Заключение

Критически важные системы высокоскоростного движения поездов представляют собой киберфизические системы, содержащие вычислительную компоненту в составе с прикладной логикой, прикладной вычислительной платформой и системной вычислительной платформой; прикладную компоненту с целевыми физическими объектами и процессами, датчики и исполнительные устройства. Для обеспечения отказобезопасности этих систем требуется тщательный отбор наиболее рациональных их архитектур.

Анализ надежности широко распространенной на практике архитектуры безопасности **2003** аналитически и численно показал, что с помощью мажоритарной логики удастся существенно повысить достоверность результатов (среднее время до функционального отказа мажорированной системы в 2 раза превышает этот показатель в исходном объекте). Вместе с тем, безотказность системы, а, следовательно, ее отказобезопасность, ниже, чем у исходного объекта. Поэтому такая архитектура приемлема не выше уровня SIL3. Возможно для обеспечения этого уровня отказобезопасности предпочтительно отдавать альтернативной архитектуре **(1002)P** вследствие отсутствия в ней ВО и переключающих устройств. Она формируется из двух параллельно работающих компонент, каждая из которых построена по схеме постоянного дублирования. Однако при этом не следует забывать, что в такой системе сохраняется риск ложного срабатывания.

Показано, что для обеспечения отказобезопасности на уровне SIL4 можно применять гибридные мажоритарные архитектуры **(2003)P** или **2004**. Вместе с тем следует учитывать, что существенную часть мажоритарных структур отказобезопасности критически важных систем составляют переключаемые схемы, обеспечивающие отключение отказавших и включение резервных компонент. Это обстоятельство отрицательно сказывается на эффективности мажоритарного резервирования, поскольку связано с применением дополнительных средств и процедур.

Недостатком как аппаратного, так и программного способов мажорирования является значительное количество оборудования, даже в минимальном варианте при $n = 1$ (троирование). Другим недостатком способов мажорирования являются значительные потери производительности. При аппаратной реализации потеря производительности связана с необходимостью синхронизации процессов в резервированных каналах. При программной реализации быстродействие системы снижается из-за затрат времени на обмен информацией между каналами.

Причина этого недостатка состоит в том, что и при аппаратной, и при программной организации механизмов маскирования сбоев, т.е. голосование, определение неисправного канала, его блокирование и последующее включение в нормальную работу, используется в каждом такте работы системы вне зависимости от наличия или отсутствия сбоев. Эти временные потери при практической реализации достигают 30-50%. К недостаткам мажорирования при его реализации следует отнести также большое количество связей между каналами и определенные трудности при проектировании.

Указанные ограничения оказывают негативное, но не определяющее влияние на выбор приемлемой архитектуры отказобезопасности. Их следует учитывать для каждого конкретного объекта и условий его применения.

Список литературы

1. IEC 62278-3:2025. Железные дороги. Технические требования и демонстрация надежности, эксплуатационной готовности и безопасности.
2. IEC 62278-1:2025. Железнодорожные приложения – спецификация и демонстрация надёжности, доступности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS) – Часть 1: Общий процесс RAMS.
3. ГОСТ 33358-2015 Безопасность функциональная. Системы управления и обеспечения безопасности движения поездов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2018. III, 15 с.
4. Платунов А., Пинкевич В. Создание киберфизических систем: проблемы подготовки ИТ специалистов // *Control Engineering (Россия)*. 2021. № 3(93). С. 64-70.
5. Шубинский И.Б. Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте: монография / И.Б. Шубинский, Е.Н. Розенберг. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 360 с.
6. Гапанович В.А., Розенберг Е.Н., Шубинский И.Б. Некоторые положения отказобезопасности и киберзащитности систем управления // *Надежность*. 2014. № 2. С. 88-100.
7. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: Изд. Журнала «Надежность», 2012. 296 с.
8. Шубинский И.Б. Отказоустойчивость и отказобезопасность систем управления: монография. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2026. 340 с.

References

1. IEC 62278-3:2025. Railways – Specification and demonstration of reliability, availability, and safety.
2. IEC 62278-1:2025. Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS process.
3. GOST 33358-2015 Functional safety. Control and safety systems for train operation. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2018. (In Russ.)
4. Platunov A., Pinkevich V. [Creating cyberphysical systems: matters of IT worker training]. *Control Engineering (Russia)* 2021;3(93):64-70. (In Russ.)
5. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. [Functional safety of control systems in railway transportation]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneria; 2023. (In Russ.)
6. Gapanovich V.A., Rozenberg E.N., Shubinsky I.B. Some concepts of fail-safety and cyber protection of control systems. *Dependability* 2014;2:95-100.
7. Shubinsky I.B. [Functional dependability of information systems. Analysis methods]. Moscow: Dependability Journal Publishing; 2012. (In Russ.)
8. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. [Fail-safety of control systems: a monograph]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneria; 2026. (In Russ.)

Сведения об авторах

Гапанович Валентин Александрович, кандидат технических наук, президент Ассоциации «Объединение производителей железнодорожной техники».

Шубинский Игорь Борисович, доктор технических наук, профессор, главный эксперт АО «НИИАС», 119333, Москва, ул. Вавилова 48, кв.339.

About the authors

Valentin A. Gapanovich, Candidate of Engineering, President of Association “Union of Industries of Railway Equipment”.

Igor B. Shubinsky, Doctor of Engineering, Professor, Chief Expert, JSC NIIAS, 48 Vavilova St., app. 339, 119333, Moscow.

Вклад авторов

Гапанович В.А. сформулировал задачи обеспечения отказобезопасности критически важных объектов высокоскоростного движения как киберфизических систем, определил требования к их функциональной безопасности.

Шубинский И.Б. выполнил аналитическую и численную оценки функциональной надежности и отказобезопасности систем с мажоритарной логикой, в том числе гибридных мажоритарных систем.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оценка транспорта электрической энергии по электрическим сетям ПАО «Россети Центр»

Assessments of electric energy transportation through the electric grid of PAO Rosseti Tsentr

Наумов И.В.^{1*}, Подъячих С.В.¹, Ямщикова И.В.², Якупова М.А.¹, Федоринова Э.С.¹
Naumov I.V.^{1*}, Podyachikh S.V.¹, Yamshchikova I.V.², Yakupova M.A.¹, Fedorinova E.S.¹

¹ Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Иркутск, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

¹ Irkutsk State Agrarian University, Irkutsk, Russia

² Irkutsk Polytech, Irkutsk, Russia

* professornaumov@list.ru



Наумов И.В.



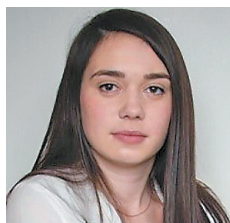
Подъячих С.В.



Ямщикова И.В.



Якупова М.А.



Федоринова Э.С.

Резюме. Целью статьи является аналитическая оценка уровня надежности электропередачи по электрическим сетям ПАО «Россети Центра». В предлагаемом исследовании дана характеристика структуры компании, подробно представлена балансовая характеристика транспорта объемов электрической энергии в сети компании и из ее сетей потребителям. Отмечены недостатки отчетной деятельности компании. На основе опубликованной в открытом доступе информации, произведен анализ аварийных событий в электрических сетях компании за исследуемый период, отмечены особенности электропередачи по каждому из филиалов компании. Введено понятие удельной аварийности, определяющей интенсивность внедрения противоаварийных мероприятий, разрабатываемых каждой компанией для снижения величины недоотпуска электрической энергии в результате аварийных отключений. Произведен анализ основных причин возникновения событий отказов, в результате которых установлено, что основными причинами их возникновения является воздействие повторяющихся стихийных явлений, а также несвоевременное производство технического обслуживания электроустановок. В качестве основных использованы **методы** численного анализа, а также общенаучные методы обработки информации. Визуализация анализируемого материала представлена диаграммами, полученными на основе использования технологий графического редактора MATLAB. **Результаты** исследования могут быть интересны техническим специалистам электросетевых компаний ПАО «Россети» а также научным работникам, занимающихся исследованиями в области надежности электроснабжения.

Abstract. The paper aims to analytically assess the reliability of energy transmission through the electric grid of PAO Rosseti Tsentr. The study describes the company's structure and provides a detailed balance of electric energy transmission through the company's grid and from the grid to the consumers. The shortcomings of the company's reporting activities are noted. Based on publicly available information, the authors analysed the accidents that affected the company's grid within the addressed period of time while noting the specificity of energy transmission in each of the company's branches. The concept of specific accident rate is introduced to define the rate of adopted emergency measures that have been developed by each company to reduce the undersupply of electric energy caused by emergency shutdowns. The main causes of failures were analysed. As a result, it was established that the main causes are the effects of repeated natural phenomena, as well as untimely maintenance of electrical installations. The authors primarily used the **methods** of numerical analysis, as well as general scientific methods of information processing. The analysed materials were visualised in the form of MATLAB diagrams. The **results** of the study may be of interest to technical specialists of the PAO ROSSETI electric grid companies, as well as researchers who specialise in power supply reliability.

Ключевые слова: аварийные отключения, отказы, недоотпуск электроэнергии, удельная аварийность.

Keywords: emergency shutdowns, failures, undersupply of energy, specific accident rate.

Для цитирования: Наумов И.В., Подъячих С.В., Ямщикова И.В., Якупова М.А., Федоринова Э.С. Оценка транспорта электрической энергии по электрическим сетям ПАО «Россети Центр» // Надежность. 2026. №2. С. 17-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-17-24>

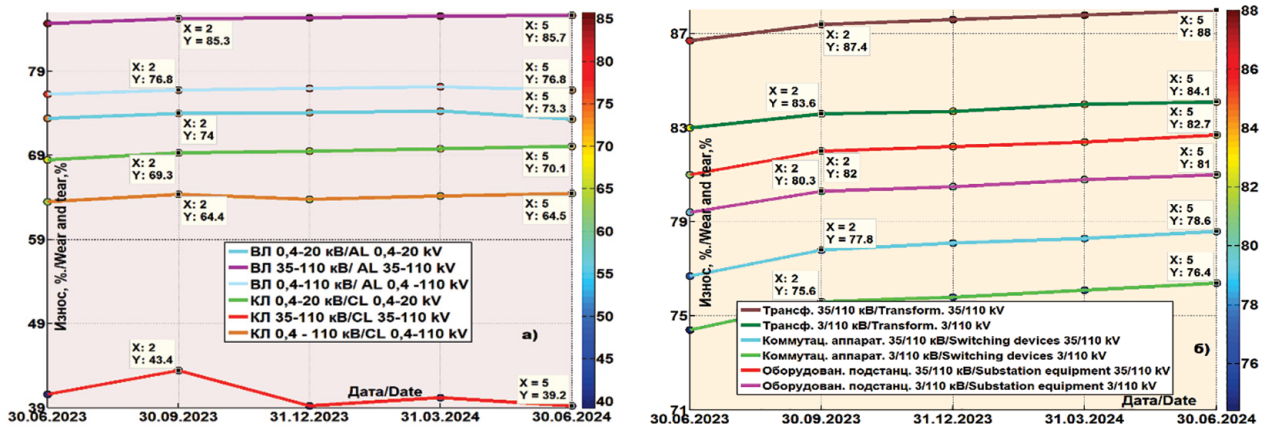


Рис. 3. Износ электросетевой структуры ПАО «Россети Центр»: а) ЛЭП; б) Трансформаторные подстанции и коммутационная аппаратура

За весь период (2018-2025 гг.) в сети компании РЦ передано 843 747,7 млн. кВт·ч электрической энергии (ЭЭ), а электропередача из сетей компании непосредственно потребителям составила 392 397,8 млн. кВт·ч. ЭЭ. Наибольшее количество ЭЭ было передано в сети РЦ в 2025 г. – 12,89% от суммарного количества всей ЭЭ, переданной в сети РЦ (108782,5572 млн. кВт·ч). При этом большее количество ЭЭ поставляется в сети ВЭ: в 2018 г – 20,04% всей переданной ЭЭ в сети в этом году; в 2019 – 19,08%; в 2020 – 20,46%; в 2021 – 20,46%; в 2022 – 15,61%; в 2023 – 15,7%; в 2024 – 15,63% и в 2025 г – 16,02%.

Передача ЭЭ из сетей компании РЦ непосредственно потребителям в большей степени соответствует 2022 г. – 13,73% от суммарного значения переданной ЭЭ из сетей РЦ потребителям. При этом наибольшее количество переданной ЭЭ потребителям также приходится на долю филиала ВЭ: в 2018 г. – 17,27% всей переданной ЭЭ в этом году (8423,330385572 млн. кВт·ч); в 2019 – 17,61%; в 2020 – 17,92%; в 2021 – 17,92%; в 2022 – 27,98%; в 2023–2024 – 18,73% и в 2025 – 18,65%.

2. Характеристика аварийности ПАО РЦ

Под техническим состоянием электрических сетей (ЭС) следует понимать совокупность свойств, характеризующих в определенный момент времени соответствие исследуемого объекта ЭС требованиям норм и условиям обеспечения технологического процесса (в данном случае – преобразования, распределения и передачи ЭЭ потребителям). За аварийное отключение, как правило, принимается отключение энергопринимающих устройств, связанное с выходом из строя (поломкой) оборудования сетевой компании или конечного потребителя.

Безусловно, повышение уровня аварийности в электрических сетях любой электросетевой компании в первую очередь зависит от степени износа и старения основного электрооборудования и элементов этих сетей.

Передача ЭЭ посредством использования воздушных ЛЭП является наиболее уязвимым, с точки зрения обеспечения надежности, способом доставки ЭЭ потреби-

телю. Это объясняется достаточно высоким уровнем параметра потока отказов

$$\omega = \omega_1(t) + \omega_2,$$

где $\omega_1(t)$ – поток отказов, обусловленный старением и износом основных элементов воздушных ЛЭП; ω_2 – поток отказов, связанных со случайными событиями (шквалистый ветер, наезд транспорта, перекрытие изоляции птицами, возгорание деревянных опор от молниевых разрядов и проч.). При этом следует различать понятия старения и износа указанных элементов¹, поскольку и то и другое характеризуется постепенным изменением физико-химических свойств элемента. Но при старении учитывается естественный процесс эксплуатации без учета режимных особенностей, а износ – непосредственно характеризуется влиянием режимных характеристик. Так или иначе, по мы привыкли объединять эти понятия по общим термином «износ».

На рис. 3 представлена динамика изменения износа основного электросетевого оборудования ПАО «Россети Центр» всего за 1 год: с 30.06.2023 г. по 30.06.2024 г. [4].

Анализ рис. 3 показывает, что общий износ ЛЭП (включая воздушные и кабельные) на 30.06.2024 г. (рис. 3, а) составил: для напряжения 35-110 кВ – 78,6%; для 3-20 кВ – 73,9% и для 0,4 кВ – 69,9%; трансформаторное оборудование (рис. 3, б): 35-110 кВ – 88%; 2-110 кВ – 84,1%; коммутационные аппараты (рис. 2, б): 35-110 кВ – 78,6%; 3-110 кВ – 76,4%; оборудование подстанций (рис. 3, б): 35-110 кВ – 82,7%; 3-110 кВ – 81%. Таким образом общий усредненный износ электросетевого оборудования в ПАО «Россети Центр» на 30.06.2024 г. составил 76,7%.

3. Аварийность в электрических сетях РЦ

Рассмотрим аварийную обстановку в сетях компании РЦ за период 2018–2024 гг. на основании данных, опубликованных в открытой печати [5]. Как показал

¹ Под элементом электрической сети следует понимать ту ее часть, уровень надежности которой исследуется независимо от надежности составляющих ее компонентов

анализ рис. 4, общему количеству аварийных отключений за весь период наблюдений (2018-2024 гг.), равному 197339 шт., соответствует недоотпуск ЭЭ в общем объеме 186262,4352 МВт·ч. Таким образом, исходя их общей протяженности исследуемых электрических сетей, можно усредненно определить удельную аварийность в этих сетях, которая составляет 0,47 отказа на 1 км протяженности сетей. При этом аналогично можно определить и удельную величину недоотпуска ЭЭ, которая также усредненно составила 943,87 кВт·ч на 1 событие отказа. Наибольшее количество отказов по компании РЦ произошло в 2023 г. они составили 25,65% (50622 шт.) от всего количества отказов. Соответственно и величина недоотпуска ЭЭ в этом году также превысила недоотпуск по другим годам наблюдения и составила 74,31% (141923,2 МВт·ч) всего недоотпуска компании за исследуемый период. Наиболее повреждаемым месяцем оказался июль. На долю этого месяца приходится 13,1% (25785 шт.) всех отказов.

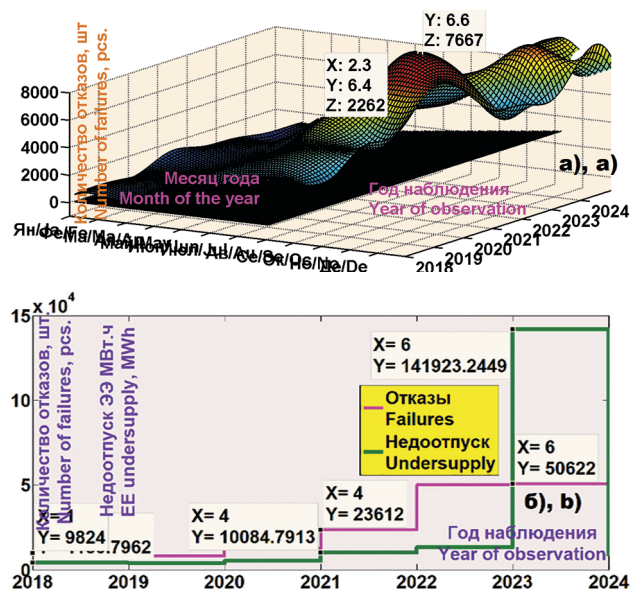


Рис. 4. Диаграммы изменения аварийности в электрических сетях РЦ: а) отказы, б) недоотпуск ЭЭ

Из всех филиалов компании РЦ наибольшая величина недоотпуска ЭЭ соответствует компании «Белгородэнерго». На долю этого филиала приходится 58,35% (111437,1525 МВт·ч.) всей недопоставленной ЭЭ за исследуемый период. При этом 2023 г. также для этого филиала стал самым «повреждаемым». В этом году в результате аварийных отключений было недопоставлено 91,7% ЭЭ (102188,0008 МВт·ч.) от всего количества ЭЭ, недопоставленной в этом филиале за весь период наблюдения.

Введем понятие удельной аварийности (УА). Для каждого из филиалов ПАО РЦ УА будем оценивать по величине недопоставленной ЭЭ в результате аварийных отключений. При этом величину недоотпуска будем рассматривать только с 2018 по 2023 г., поскольку в 2024 г. информация по компаниям дается только по 1 и 2 кварталам. В 3 и 4 кварталах этого года недоотпуск дается в целом по компании, без выделения филиалов.

Рассмотрим УА в 2 видах – по величине недоотпуска ЭЭ в месяц ($\alpha = W/12$, МВт·ч/мес) и величине недоотпуска ЭЭ на 1 км длины ЛЭП ($\beta = W/l$, кВт·ч/км). Результаты произведенных расчетов представлены в табл. 1 и визуализированы на рис. 5.

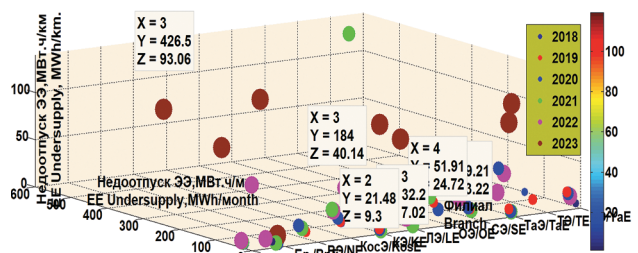


Рис. 5. Изменение удельного недоотпуска ЭЭ в электрических сетях РЦ за 2018-2023 гг.

Как видно из рис. 5, изменение удельного недоотпуска (УН) ЭЭ не имеет конкретно-выраженной динамики повышения или снижения в промежутке 2018 -2021 гг. Но с 2021 по 2023 происходит их резкое увеличение.

Для филиала БелЭ суммарное значение для показателя α за 2018-2023 гг. (МВт·ч/мес) составило 8925,94.

Табл. 1. Удельная аварийность по ПАО «Россети Центр»

| Филиал Branch | 2018 | | 2019 | | 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | |
|------------------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | α | β | α | β | α | β | α | β | α | β | α | β |
| БелЭ/BelE | 23,32 | 5,41 | 25,2 | 5,9 | 24,65 | 5,7 | 26,95 | 6,3 | 310,15 | 7,2 | 8515,67 | 1980 |
| БрЭ/BrE | 36,51 | 1,32 | 19,63 | 0,708 | 21,32 | 0,77 | 25,76 | 0,93 | 55,16 | 1,99 | 21,48 | 9,3 |
| ВЭ VE | 32,2 | 7,02 | 33,77 | 7,37 | 53,79 | 11,74 | 44,39 | 9,68 | 183,98 | 40,14 | 426,51 | 93,06 |
| КосЭ/KosE | 25,57 | 13,13 | 29,32 | 13,96 | 36,66 | 17,46 | 51,91 | 24,72 | 49,54 | 23,59 | 250,45 | 119,26 |
| КЭ/KE | 11,71 | 3,94 | 12,08 | 4,06 | 10,85 | 3,65 | 8,19 | 2,75 | 109,28 | 36,73 | 1 139,53 | 383,04 |
| ЛЭ/LE | 22,38 | 7,54 | 29,3 | 9,88 | 39,21 | 13,22 | 10,02 | 3,38 | 28,17 | 9,5 | 201,58 | 67,95 |
| ОЭ/OE | 38,47 | 17,09 | 44,01 | 19,56 | 30,87 | 13,72 | 54,71 | 24,32 | 99,36 | 44,16 | 192,47 | 85,54 |
| СЭ/SE | 40,44 | 11,08 | 33,82 | 9,3 | 38,33 | 10,5 | 30,55 | 8,37 | 63,43 | 17,38 | 225,78 | 61,86 |
| ТаЭ/TaE | 14,44 | 6,06 | 16,6 | 6,96 | 11,77 | 4,94 | 10,95 | 4,59 | 49,08 | 20,59 | 88,18 | 37,0 |
| ТЭ/TE | 64,11 | 14,97 | 41,75 | 9,75 | 136,38 | 31,84 | 549,5 | 128,3 | 121 | 28,25 | 448,35 | 104,67 |
| ЯЭ/YaE | 12,87 | 4,5 | 37,98 | 13,29 | 34,94 | 12,22 | 27,48 | 9,62 | 28,9 | 10,11 | 198,32 | 69,38 |

В 2018 г. значение этого коэффициента составляло 0,26% от суммарной величины, в 2019 – 0,28%; 2020 – 0,276%; 2021 – 0,3%; 2022 – 0,347%; 2023 – 95,4%. Филиал БрЭ – суммарное значение α составило 179,86, процентное соотношение по годам к этому значению: 2018 – 20,29%; 2019 – 10,91%; 2020 – 11,85%; 2021 – 14,32%; 2022 – 30,67% и 2023 – 11,94%. Воронежские сети – суммарное значение α за весь период – 777,64; 2018 – 4,16%; 2019 – 4,36%; 2020 – 6,94%; 2021 – 5,73%; 2022 – 23,75% и 2023 – 55,06%. Электрические сети КосЭ: суммарное $\alpha = 443,45$; 2018 – 5,77%; 2019 – 6,61%; 2020 – 8,27%; 2021 – 11,71%; 2022 – 11,17% и 2023 – 56,48%. Филиал КЭ: $\alpha_{\text{СВМ}} = 1291,64$; 2018 – 0,91%; 2019 – 0,94%; 2020 – 0,84%; 2021 – 0,63%; 2022 – 8,46% и 2023 – 88,22%. Для электрических сетей ЛЭ: $\alpha_{\text{СВМ}} = 330,66$ 2018 – 6,77%; 2019 – 8,86%; 2020 – 11,86%; 2021 – 3,03%; 2022 – 8,52% и 2023 – 60,96%. В сетях ОЭ $\alpha_{\text{СВМ}}$ составило 459,89. В 2018 г. значение этого показателя составило 8,37%; 2019 – 9,56%; 2020 – 6,71%; 2021 – 11,89%; 2022 – 21,61% и 2023 – 41,85%. Электрические сети СЭ: $\alpha_{\text{СВМ}} = 432,35$; в 2018 г. – 9,35%; 2019 – 7,82%; 2020 – 8,87%; 2021 – 7,07%; 2022 – 14,67% и 2023 – 52,22%. Для Тамбовских ЭС показатель $\alpha_{\text{СВМ}} = 191,02$; в 2018 г. – 7,56%; 2019 – 8,69; 2020 – 6,16%; 2021 – 5,73%; 2022 – 25,69% и 2023 – 46,16%. Значение $\alpha_{\text{СВМ}}$ для электрических сетей «Тверьэнерго» составляет 1361,09. Соответственно в 2018 г. на долю этого коэффициента приходится 4,7%; в 2019 – 3,07%; 2020 – 10,02%; 2021 – 40,37%; 2022 – 8,89% и в 2023 – 32,94%. Для электрических сетей ЯЭ $\alpha_{\text{СВМ}} = 340,49$. Распределение этого показателя по годам исследуемого периода в процентном соотношении к суммарному $\alpha_{\text{СВМ}}$ выглядит следующим образом: 2018 – 3,78%; 2019 – 11,15%; 2020 – 10,26%; 2021 – 8,07%; 2022 – 8,49% и 2023 – 58,25%.

Таким образом, удельный недоотпуск ЭЭ в среднем, в расчете на 1 месяц имеет достаточно устойчивую тенденцию увеличения у трех филиалов: БелЭ (среднегодовой прирост удельной аварийности, без учета 2023 г. составляет 1,076% в год). В 2023 г. происходит «взрывное» повышение α – более, чем в 27 раз к 2022 г. В ЭС ВЭ средний ежегодный прирост удельного недоотпуска по данному показателю составляет 1,9% (с учетом значительного увеличения показателя в 2022 г.). И в 2023 г. также происходит резкое возрастание показателя – в 2,32 раза к 2022 г.

И все же наиболее характерным показателем может служить значение удельного недоотпуска ЭЭ на единицу протяженности ЛЭП каждой компании. Для филиала БелЭ суммарное значение для показателя β за 2018–2023 гг. (МВт·ч/км) составило 2010,51. В 2018 г. значение этого коэффициента составляло 0,27% от суммарной величины β , в 2019 – 0,29%; 2020 – 0,28%; 2021 – 0,31%; 2022 – 0,36%; 2023 – 98,48%. Филиал БрЭ – суммарное значение β составило 15,018; процентное соотношение по годам к этому значению: 2018 – 8,79%; 2019 – 4,71%; 2020 – 5,13%; 2021 – 6,19%; 2022 – 13,25% и 2023 – 61,93%. Воронежские сети – суммарное значение β за

весь период – 169,01; 2018 – 4,15%; 2019 – 4,36%; 2020 – 6,95%; 2021 – 5,73%; 2022 – 23,75% и 2023 – 55,06%. Электрические сети КосЭ: суммарное $\beta = 212,12$; 2018 – 6,19%; 2019 – 6,58%; 2020 – 8,23%; 2021 – 11,65%; 2022 – 11,12% и 2023 – 56,22%. Филиал КЭ: $\beta_{\text{СВМ}} = 434,17$; 2018 – 0,907%; 2019 – 0,94%; 2020 – 0,84%; 2021 – 0,63%; 2022 – 8,46% и 2023 – 88,22%. Для электрических сетей ЛЭ: $\beta_{\text{СВМ}} = 111,47$; 2018 – 6,76%; 2019 – 8,86%; 2020 – 11,86%; 2021 – 3,03%; 2022 – 8,52% и 2023 – 60,96%. В сетях ОЭ показатель $\beta_{\text{СВМ}}$ составил 204,39. В 2018 г. значение этого показателя составило 8,36%; 2019 – 9,57%; 2020 – 6,71%; 2021 – 11,9%; 2022 – 21,61% и 2023 – 41,85%. Электрические сети СЭ: $\beta_{\text{СВМ}} = 118,49$; в 2018 г. – 9,35%; 2019 – 7,85%; 2020 – 8,86%; 2021 – 7,06%; 2022 – 14,67% и 2023 – 52,21%. Для Тамбовских ЭС показатель $\beta_{\text{СВМ}} = 80,14$; в 2018 г. – 7,56%; 2019 – 8,68; 2020 – 6,16%; 2021 – 5,73%; 2022 – 25,69% и 2023 – 46,17%. Значение $\beta_{\text{СВМ}}$ для электрических сетей «Тверьэнерго» составляет 317,78. Соответственно в 2018 г. на долю этого коэффициента приходится 4,7%; в 2019 – 3,07%; 2020 – 10,02%; 2021 – 40,37%; 2022 – 8,89% и в 2023 – 32,94%. Для электрических сетей ЯЭ $\beta_{\text{СВМ}} = 119,12$. Распределение этого показателя по годам исследуемого периода в процентном соотношении к суммарному $\beta_{\text{СВМ}}$ выглядит следующим образом: 2018 – 3,78%; 2019 – 11,16%; 2020 – 10,26%; 2021 – 8,08%; 2022 – 8,49% и 2023 – 58,24%.

Как видно из проведенного анализа показателей α и β , их процентное соотношение по исследуемым годам всех филиалов компании РЦ к суммарным значениям $\alpha_{\text{СВМ}}$ и $\beta_{\text{СВМ}}$ абсолютно идентичны. Таким образом, можно считать, что процентные соотношения удельных значений величин недоотпуска ЭЭ в месяц и на 1 км протяженности ЛЭП к суммарному количеству недопоставленной ЭЭ по этим же критериям – одинаковы.

4. Анализ причин возникновения аварийных отключений

В соответствие с приказом Минэнерго России устанавливается перечень основных причин, по которым происходят повреждения в электрических сетях [6]. При этом, в зависимости от того по какой непосредственно причине произошла авария и как эта ситуация повлияла на состояние элементов электроустановок, все причины подразделяются на организационные (ОП) и технические (ТП). Цифровая обозначение ОП может включать в себя до пяти цифр, например: 3.4.7.3.5 – неудовлетворительное техническое состояние оборудования (старение изоляции, потеря механической прочности провода, изменение свойств матер. и т.д.). прочие нарушения. Цифровой код ТП обычно представлен 3- цифрами, например: 4.4.4 – механическое воздействие атмосферных явлений.

В качестве примера анализа причин повреждений в исследуемых электрических сетях рассмотрим период с июля 2023 г. по июнь 2024 г. Произведенный анализ

позволил установить, что основными группами причин, приведших к возникновению событий отказов, являются следующие: *1 группа*. ОП: 3.4.7.3 – несоблюдение технического обслуживания: несвоевременное выявление и устранение дефектов; ТП: 4.3 – механическое разрушение. деформация. перекус. нарушение механического соединения (4.3.3 – нарушение механического соединения в результате износа); *2 группа*: 3.4.8.2 – воздействие посторонних лиц и организаций. не участвующих в технологическом процессе: наброс посторонних предметов на ВЛ. проезд. крупногабаритной техники и прочее; ТП: 4.4 – внешнее механическое воздействие (4.4.1 – механическое воздействие сторонних лиц и организаций; 4.11 – электродуговое повреждение; 4.13 – нарушение электрического контакта. размыкание. обрыв цепи); *3 группа*: 3.4.9.3 – воздействие организаций. участвующих в технологическом процессе: отключение (повреждение) оборудования потребителей электрической энергии: ТП – не фиксируется; *4 группа*. ОП: 3.4.10 – воздействие животных и птиц (3.4.10.2 – воздействие на ЭУ птиц). ТП: 4.17 – загрязнение. попадание инородных предметов (4.17.4 – загрязнение продуктами жизнедеятельности птиц); *5 группа*. ОП: 3.4.11 – превышение параметров воздействия стихийных явлений относительно условий проекта (3.4.11.6 – прочие превышения параметров воздействия стихийных явлений относительно условий проекта). ТП: 4.12 – нарушение электрической изоляции;

4.13 – нарушение электрического контакта. размыкание. обрыв цепи; *6 группа*. ОП: 3.4.12.2 – воздействие повторяющихся стихийных явлений: ветровые нагрузки (3.4.12.2.1 – длительное воздействие ветровой нагрузки; 3.4.12.3 – атмосферные перенапряжения. гроза). ТП: 4.4 – внешнее механическое воздействие (4.4.4 – механическое воздействие атмосферных явлений); *7 группа*. ОП: 3.4.13.2 – недостатки конструкции. дефекты монтажа. ТП: 4.12 – нарушение электрической изоляции.

Динамика произошедших отказов в рассматриваемых электрических сетях по выявленным причинам представлена в таблице 2 и на рис. 6. Следует отметить, что по 5 группе отказов никакой динамики быть не может, поскольку эта причина отмечена только в декабре 2023 г. Количество отказов по этим причинам составило 133 шт. Поэтому на графиках рис. 6 представлены группы причин: 1, 2, 3, 4, 6 и 7.

Табл. 2. Изменение количества аварийных отключений по причинам (2023-2024 гг.)

| Год | Месяц года | Группы причин | | | | | | |
|------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|------|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 2023 | Июль | 1198 | 542 | 494 | 133 | 0 | 5066 | 6 |
| | Август | 1025 | 499 | 367 | 134 | 0 | 3421 | 6 |
| | Сентябрь | 690 | 387 | 168 | 93 | 0 | 1145 | 3 |
| | Октябрь | 1084 | 442 | 391 | 103 | 0 | 3715 | 3 |
| | Ноябрь | 838 | 332 | 349 | 46 | 0 | 2762 | 0 |
| | Декабрь | 610 | 229 | 310 | 77 | 133 | 2402 | 2 |
| 2024 | Январь | 604 | 258 | 245 | 14 | 0 | 2050 | 7 |
| | Февраль | 547 | 200 | 239 | 20 | 0 | 1219 | 2 |
| | Март | 596 | 388 | 194 | 51 | 0 | 695 | 3 |
| | Апрель | 844 | 357 | 293 | 87 | 0 | 1945 | 4 |
| | Май | 777 | 472 | 294 | 68 | 0 | 1924 | 2 |
| | Июнь | 932 | 561 | 428 | 98 | 0 | 3887 | 2 |

Как видно из данных табл. 2, общее количество аварийных отказов за период: июль 2023-июнь 2024 гг. составило 49512 шт. При этом наибольшее количество аварийных отключений происходит по причинам, обусловленным воздействием повторяющихся стихийных явлений, которые приводят к атмосферным перенапряжениям, а также различным механическим воздействиям при проявлении этих явлений). На долю таких отказов приходится 61,06% всех аварийных отключений за исследуемый период. На втором месте по количеству несанкционированных отключений напряжения электропитания отказы 1 группы – несоблюдение технического обслуживания: несвоевременное выявление и устранение дефектов. Эти отказы составляют почти 19,6% всех аварийных отключений. Третье место занимают отказы, произошедшие по 2-й, 3-й и 4-й причинам. Их совокупное количество составляет 18,91% от общего количества отказов за этот период (2-я – 9,43% – 4667 отк.; 3-я группа – 7,62% – 3772 отк.; 4-я группа – 1,87% – 924 отк.). Ну и конечно не учтенные в рис. 6 отказы 5 группы (произошедшие только в

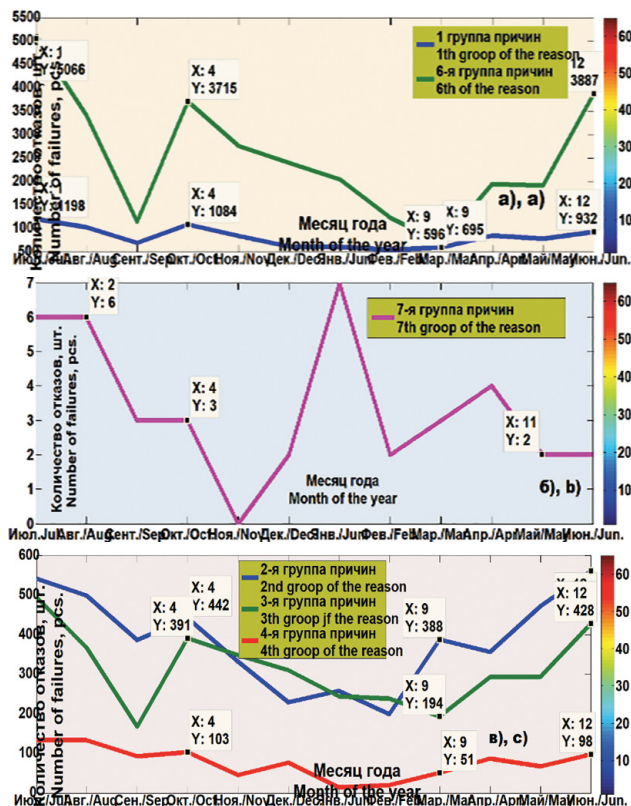


Рис. 6. Динамика изменения аварийных ситуаций в электрических сетях ПАО «Россети Центр» по основным причинам отказов за 2018-2023 гг.: а) 1-я и 6-я группы; б) 7-я группа причин; в) 2-я, 3-я и 4-я причины возникновения отказов

декабре 2023 г.), которые составили 0,27% всех отказов за этот период (133 отк.). Минимальное количество отказов приходится на долю отказов 7 группы, которые составили 0,807% всех отказов (40 шт.).

5. В качестве обсуждения

Представленная статья является продолжением исследований аварийности электрических сетей Российской Федерации, информация о которой достаточно подробно изложена в монографии [7]. Авторы считают, что объективное освещение реального положения вещей, сложившегося в системах электропередачи страны, могут действительно послужить руководством к проведению соответствующих мероприятий руководством подразделений ПАО «Россети».

Таким образом, основываясь на результатах проведенного исследования, в заключение, можно сделать следующие выводы.

Первая причина происходящих аварийных ситуаций, составляющая более 60% всех отказов и связанная с воздействием повторяющихся стихийных явлений, непосредственно обусловлена также и очень большим износом электрических сетей компании (почти 77%). Следовательно, первоочередной задачей руководства компании является разработка мероприятий, направленных на мониторинг электрических сетей, с целью выявления «слабых звеньев» в их структуре, а также разукрупнения этих сетей путем ввода в эксплуатацию новых элементов соответствующих классов номинального напряжения. При этом следует обратить внимание на внедрение элементов «smart grid», основанных на цифровизации средств управления процессами в режиме реального времени. В этой связи, в качестве пожелания руководству компании, рекомендуется усилить работу в данном направлении, включая обучение оперативного и обслуживающего персонала компании.

Поскольку почти 20% всех событий отказов приходится на причину «несвоевременное техническое обслуживание и устранение неисправностей», необходимо обратить внимание на уровень квалификации персонала компании, осуществляющего оперативное обслуживание электрических сетей. В качестве рекомендации: можно производить внеплановую проверку у персонала уровня знаний ПТЭ и ПТБ, а также организовать, по возможности, повышение квалификации персонала. При этом необходимо отметить, что материальная заинтересованность работников могла бы в значительной степени сократить «текучесть» кадров. Поэтому, возможно, руководству РЦ следует подумать об изменении з/п сотрудников.

Список литературы

1. ПАО «Россети Центр». История компании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mrsk-1.ru/about/company/history/> (дата обращения 28.03.2025).

2. Россети. Годовой отчет за 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/a82/78izowc8ubpcf62nbsaanq21p70odv77/AR2023_RUS_book_26_06_itogo.pdf (дата обращения 28.03.2025).

3. Годовой отчет публичного акционерного общества «Россети Центр» за 2023 год [Электронный ресурс]. URL: https://www.mrsk-1.ru/upload/documents/AnnualReport2023_Ru.pdf (дата обращения 28.03.2025).

4. ПАО «Россети Центр». Производственный потенциал [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mrsk-1.ru/investors/indicators/production-potential/halfyear1/> (дата обращения 08.04.2025).

5. Техническое состояние сетей [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mrsk-1.ru/customers/territory/networks/> (дата обращения 26.05.2025).

6. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 02.03.2010 г. № 90 (в ред. Приказов Минэнерго России от 06.02.2017 г. № 74, от 27.07.2017 г. № 678, от 30.09.2025 г. № 1214) «Об утверждении формы акта о расследовании причин аварий в электроэнергетике и порядка ее заполнения» Зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 22.04.2010 г. № 16973 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902204848> (дата обращения: 26.05.2025).

7. Наумов И.В. Повреждаемость электрических сетей Российской Федерации. Аналитическая оценка. М.: Колос-с, 2024. 218 с.

References

1. [PAO Rosseti Tsent. History of the company]. (accessed: 28.03.2025). Available at: <https://www.mrsk-1.ru/about/company/history/>. (In Russ.)

2. [Rosseti. 2023 annual report]. (accessed: 28.03.2025). Available at: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/a82/78izowc8ubpcf62nbsaanq21p70odv77/AR2023_RUS_book_26_06_itogo.pdf. (In Russ.)

3. [2022 annual report of Rosseti Tsent.]. (accessed: 28.03.2025). Available at: https://www.mrsk-1.ru/upload/documents/AnnualReport2023_Ru.pdf. (In Russ.)

4. [PAO Rosseti Tsent. Business potential]. (accessed: 08.04.2025). Available at: <https://www.mrsk-1.ru/investors/indicators/production-potential/halfyear1/>. (In Russ.)

5. [Grid health]. (accessed: 26.05.2025). Available at: <https://www.mrsk-1.ru/customers/territory/networks/>. (In Russ.)

6. [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated March 2, 2010 No. 90 (as amended by Orders of the Ministry of Energy of Russia dated February 6, 2017 No. 74, July 27, 2017 No. 678, and September 30, 2025 No. 1214) On the Approval of the Form of the Act on Investigation of the Causes of Accidents in the Electric Power Industry and the Procedure for Completing It Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on April 22, 2010 No. 16973]. (accessed: 26.05.2025). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902204848>. (In Russ.)

7. Naumov I.V. [Damage rate of electrical grid of the Russian Federation. An analytical assessment]. Moscow: Kolos-s; 2024. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Наумов Игорь Владимирович – 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, ул. Черемуховая, дом 19б, и ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, профессор кафедры электроснабжения и электротехники, доктор технических наук, профессор, засл. работн. ВО России, академик РАЕ, IEEE Senior member, e-mail: professorsnaumov@list.ru

Подъячих Сергей Валерьевич – 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, дом 5 Б, кв. 409, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ заведующий кафедрой, к.т.н., доцент кафедры Электроснабжения и электротехники,.

Ямщикова Ирина Валентиновна – 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, ул. Черемуховая, дом 19б, ФГБОУ ВО «ИРНТУ», доцент кафедры Экспертизы и управления недвижимостью, к.э.н., доцент; e-mail: yamsirina@yandex.ru

Якупова Марина Андреевна – 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, ул. Приморская 25, кв. 120, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, ст. преподаватель кафедры Электроснабжения и электротехники, к.т.н. e-mail: yakupovamarina199@yandex.ru.

Федоринова Эльвира Сергеевна – 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, ул. Приморская 25, кв. 120, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ доцент кафедры Электроснабжения и электротехники, fec89834052365@yandex.ru.

About the authors:

Igor V. Naumov, 19b Cheremukhovaya St., Molodezhny, Irkutsky District, Irkutsk Oblast, 664038, Russian Federation, Irkutsk State Agrarian University, Professor, Department

of Power Supply and Electrical Engineering, Doctor of Engineering, Professor, Honorary Worker of Higher Education of Russia, Member of the Russian Academy of Education, IEEE Senior member, e-mail: professorsnaumov@list.ru

Sergey V. Podyachikh, 5 B, apt. 409, Molodezhny, Irkutsky District, Irkutsk Oblast, 664038, Russian Federation, Irkutsk State Agrarian University, Head of Department, Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrical Engineering, e-mail: psv78@yandex.ru

Irina V. Yamshchikova, 19b Cheremukhovaya St., Molodezhny, Irkutsky District, Irkutsk Oblast, 664038, Russian Federation, Irkutsk Polytech, Associate Professor, Department of Real Estate Expert Evaluation and Management, Candidate of Economics, Associate Professor; yamsirina@yandex.ru

Marina A. Yakupova, 25, apt. 120 Primorskaya st., Molodezhny, Irkutsky District, Irkutsk Oblast, 664038, Russian Federation, Irkutsk State Agrarian University, Senior Teacher, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Candidate of Engineering, e-mail: yakupovamarina199@yandex.ru

Elvira S. Fedorinova, 25, apt. 120 Primorskaya st., Molodezhny, Irkutsky District, Irkutsk Oblast, 664038, Russian Federation, Irkutsk State Agrarian University, Senior Lecturer, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Candidate of Engineering, e-mail: fec89834052365@yandex.ru

Вклад авторов в статью:

Наумов И.В. – Идея статьи, написание, анализ.

Подъячих С.В. – сбор материалов, визуализация.

Ямщикова И.В. – сбор материалов, анализ.

Якупова М.А. – сбор материалов.

Федоринова Э.С. – сбор материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Влияние изменения климата на функциональную надежность автотранспортных сетей

The effect of climate change on the functional reliability of motor transport networks

Тимашев С.А.^{1,2*}, Пономарев В.А.^{1*}
Timashev S.A.^{1,2*}, Ponomarev V.A.^{1*}

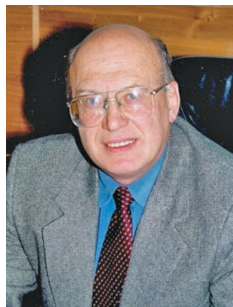
¹ Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, Екатеринбург

² Уральский Федеральный Университет, Российская Федерация, Екатеринбург

¹ Research and Engineering Centre Reliability and Service Life of Large-Scale Systems and Machines, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

* E-mail: timashevs@gmail.com, wasilko@rambler.ru



Тимашев С.А.



Пономарев В.А.

Резюме. Цель. В статье рассматривается проблема учета влияния изменения климата на функциональную надежность региональных дорожных сетей. Предложены алгоритм и методология оценки функциональной надежности дороги, основанные на оценке долговечности и остаточного срока службы дорожного покрытия по критериям деформации: (1) максимально допустимый остаточный прогиб дорожного покрытия, (2) снижение модуля деформации материала дорожного покрытия в результате многократной упругопластической деформации под воздействием транспортного потока, (3) появление неприемлемых продольных выбоин и/или ям. **Методы.** Для определения вероятности отказа каждого участка дорожной сети разработан метод определения начальной надежности с учетом динамических воздействий (нагрузки от проезжающих транспортных средств), внешних (атмосферных) воздействий и человеческого фактора (нарушение способа укладки асфальтобетона) с использованием байесовских сетей в формате программного пакета GeNie. Математическая модель дорожной сети в виде байесовской сети позволяет моделировать (1) климатические/погодные условия, (2) движение транспорта в реальном времени после аварии с использованием агентной модели, которая использует информацию о движении, накопленную посредством непрерывного мониторинга (включая видеокамеры и БПЛА), время в пути каждого транспортного средства и объем движения на каждой дороге. Надежность выбранной транспортной сети и вероятность отказа каждого ее участка были рассчитаны с использованием байесовской сети, а остаточный срок службы каждого участка дороги был рассчитан на основе деформационных критериев. **Результаты.** Проведен сравнительный анализ уязвимости дорожной сети Екатеринбург-Тюменского маршрута (Уральский федеральный округ) как для пассажирских, так и для грузовых перевозок, с учетом и без учета климатических изменений, характерных для Среднего Урала, на примере дорожно-транспортного происшествия, приведшего к частичному разрушению одного моста и перераспределению транспортных потоков. Результаты расчета остаточного ресурса, вероятности безотказной эксплуатации и надежности каждого участка сети этих дорог позволили выявить наиболее уязвимые участки дорожной сети Уральского федерального округа и объем необходимых ремонтных работ для поддержания их работоспособности. **Заключение.** Применение разработанной методики показало, что функциональная надежность Екатеринбург-Тюменского маршрута для регулярных перевозок составляет 99,55%, а для транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн – 98,47%. Использование агентной модели поведения водителей для оценки и анализа уязвимости транспортной сети Екатеринбург-Тюмень в случае обрушения моста показало, что продление маршрута из-за обрушения моста приводит к увеличению углеродного следа дорожной сети и негативному воздействию на окружающую среду.

Abstract. Aim. The paper examines the matter of accounting for the effect of climate change on the functional reliability of regional road networks. An algorithm and method for assessing the functional reliability of a road are proposed that are based on assessing the durability and residual life of the road surface structure according to deformation criteria: (1) the maximum permissible residual deflection of the road surface, (2) the decrease of the deformation modulus of the road surface material as a result of multiple elastic-plastic deformation of the road surface caused by traffic, (3) the emergence of unacceptable longitudinal potholes. **Methods.** The mathematical model of a road network in the form of a Bayesian network allows

simulating (1) climate/weather conditions, (2) real-time traffic following an accident using an agent-based model that uses traffic information accumulated through continuous monitoring (including surveillance cameras and drones), travel time of each vehicle, and traffic volume on each road. For the purpose of identifying the probability of failure of each section of the road network, a method was developed for determining the initial reliability that takes into account the effect of various factors of destruction of the road surface structure. The reliability of the selected transport network and the PoF of each of its sections were calculated using a Bayesian network, and the residual life of each road section was calculated based on deformation criteria. **Results.** A comparative analysis of the vulnerability of the road network of the Yekaterinburg-Tyumen route (Ural Federal District) for both passenger and freight transport was conducted, both taking into account the climate trends of the Middle Urals and otherwise, using the example of a traffic accident that resulted in a partial destruction of a single bridge and a redistribution of traffic flows. The identified residual life, the probability of failure-free operation and the reliability of each section of the road network allowed identifying the most vulnerable sections of the road networks of the Ural Federal District, as well as the scope of necessary repair activities. **Conclusion.** The application of the developed method also showed that the functional reliability of the Yekaterinburg-Tyumen route for regular transport is 99.55% and 98.47% for vehicles with a carrying capacity of over 20 tons. The use of an agent-based model of driver behaviour to assess and analyse the vulnerability of the Yekaterinburg-Tyumen transport network in the event of a bridge failure showed that the extension of the route due to a bridge failure leads to an increase in the carbon footprint of the road network and a negative impact on the environment.

Ключевые слова: функциональная надежность, транспортная сеть, изменение климата, долговечность, остаточный ресурс.

Keywords: functional reliability, transport network, climate change, durability, residual life.

Для цитирования: Тимашев С.А., Пономарев В.А. Влияние изменения климата на функциональную надежность авторанспортных сетей // Надежность. 2026. №2. С. 25-32. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-25-32>

For citation: Timashev S.A., Ponomarev V.A. The effect of climate change on the functional reliability of motor transport networks. *Dependability* 2026;2: 25-32. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-25-32>

Поступила: 20.12.2025 / **После доработки:** 10.01.2026 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 20.12.2025 / **Revised on:** 10.01.2026 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Проблема оценки надежности развитой автодорожной сети весьма актуальна, особенно в свете усложнения транспортно-логистических цепей, постоянного роста трафика перевозок, деградации дорожного полотна от воздействия транспорта, перепадов температур, неблагоприятных погодных условий, изменения климата, морозного пучения, землетрясений, селей, оползней, сходов лавин, разрушения и сноса мостов из-за паводков и наводнений, недостаточных средств на ремонт, и др.

Под функциональной надежностью (ФН) региональной автодорожной сети понимается надежность основного маршрута, для которого предназначена данная сеть. ФН основного маршрута равна произведению надежностей участков сети, которые его образуют.

В случае когда основной маршрут состоит из нескольких эквивалентных маршрутов, его надежность вычисляется по формуле:

$$R_{сети} = 1 - Q_1 * Q_2 * \dots * Q_n, \quad (1)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n – вероятности отказа путей числом n , составляющих основной маршрут.

Расчет надежности сети показывает, что чем большим количеством равнозначных путей организован выбранный маршрут, тем его надежность выше, соответственно, и выше надежность всей транспортной сети.

1. Математическая модель автодорожной сети

При оценке функциональности транспортной сети используется ее математическая модель, с помощью которой производится выбор маршрута каждым водителем транспортного средства, рассчитывается время в пути и транспортный поток на каждой дороге. Стационарное во времени распределение трафика находится из решения задачи оптимизации функционирования транспортной сети [7]:

$$\min Z(x) = \sum_i \int_0^{x_i} t_i(w) dw, \quad (2)$$

где x_i – объем трафика на дороге i ; t_i – время проезда по дороге i :

$$t_i(x_i) = t_0 \left(1 + \alpha \left[\frac{x_i}{C_0 * N_L} \right]^\beta \right), \quad (3)$$

где t_0 – время беспрепятственного проезда по i -ой дороге; C_0 – пропускная способность одной полосы движения; N_L – количество полос i -ой дороги; α и β – переменные параметры, определяемые как 3,0 и 4,0 соответственно для расчетных скоростей 20 км/ч и 30 км/ч и 4,5 соответственно для расчетной скорости 40 км/ч и выше [7].

Общее время проезда дороги определяется следующим образом:

$$C_i = \sum f_i(x_i) \delta_i, \quad (4)$$

где δ_i – логическая функция, показывающая, проходит ли выбранный маршрут по i -ой дороге.

2. Моделирование транспортного трафика в реальном времени после ДТП с помощью агент-ориентированной модели

Агентное моделирование – мощный метод анализа распределенных сложных систем, подходящий для моделирования систем при трех условиях: проблемная область пространственно распределена; подсистемы существуют в динамической среде; подсистемы должны взаимодействовать друг с другом с большей гибкостью [7].

3. Инициализация агент-ориентированной модели [7]

При непрерывном мониторинге дорожного движения (в том числе, с помощью видеокамер и дронов) накапливается информация о времени в пути каждого транспортного средства и объеме транспортного потока на каждой дороге транспортной сети. При этом число автомобилей на каждой дороге I_i , составляет:

$$I_i = x_i * t_i. \quad (5)$$

Вероятность того, что отдельный автомобиль на i -ой дороге будет иметь определенный маршрут k между исходной точкой r и пунктом назначения s , составляет [7]:

$$P_{i,rs} = \frac{\sum_{k \in \Psi_{rs}} f_k^{rs} \delta_i}{x_i}, \quad (6)$$

где f_k^{rs} – объем трафика k -ого маршрута между исходной точкой r и пунктом назначения s ; Ψ_{rs} – набор всех маршрутов между r и s .

С помощью уравнения (6) каждому автомобилю на i -ой дороге направление движения назначается случайным образом. Вероятность того, что отдельная машина с назначенным определенным направлением движения r - s будет проезжать по определенному маршруту r - t , равна [7]:

$$P_{i,rt}^{rs} = \frac{f_{rt}^{rs} \delta_{i,rt}}{\sum_{k \in \Psi_{rs}} f_k^{rs} \delta_i}. \quad (7)$$

С помощью уравнения (7) каждому автомобилю на i -ой дороге случайным образом назначается маршрут движения. Предполагая, что автомобили равномерно распределены по дорогам (звеньям транспортной сети), время, за которое j -ый автомобиль в очереди дойдет до перекрестка между звеньями, равно [7]:

$$t_{j,a} = t_i(x_i) * \frac{j}{I_i}. \quad (8)$$

4. Алгоритм оценки долговечности дорожного покрытия

Под долговечностью дорожного покрытия (ДДП) обычно понимается время, в течение которого оно сохраняет свои основные свойства на уровне, удовлетворяющем требованиям эксплуатации.

В настоящее время для оценки ДДП конкретного участка дорожной сети задается начальная надежность (вероятность безотказной работы при нормативных средних значениях параметров прочности и жесткости автодорожного покрытия (ДП)).

С позиций теории надежности автомобильная дорога – восстанавливаемая система. Поскольку аналитический расчет восстанавливаемых сетевых систем не разработан, в межремонтное время автодорога рассчитывается как невосстанавливаемая система [4].

Элементы невосстанавливаемых систем с точки зрения долговечности имеют следующие показатели [4]:

$P(t)$ – вероятность безотказной работы элемента в течение времени t (функция долговечности);

$f(t)$ – плотность распределения времени безотказной работы;

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов в момент времени t ;

T_0 – среднее время безотказной работы;

P_0 – начальная надежность элемента (вероятность безотказной работы при нормативных средних значениях параметров прочности и жесткости автомобильной дороги).

Между показателями долговечности существуют следующие зависимости [4]:

$$P(t) = P_0 e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (9)$$

$$T_0 = \int_0^\infty P(t) dt. \quad (10)$$

Данные выражения показывают, что исходной функцией в расчете долговечности является интенсивность отказов.

Для определения долговечности (среднего времени безотказной работы) дорожного покрытия применяется закон распределения Вейбулла:

$$\lambda(t) = \alpha \lambda t^{(\alpha-1)} \rightarrow P(t) = P_0 e^{-\lambda t^\alpha} \rightarrow T_0 = P_0 \int_0^\infty e^{-\lambda t^\alpha} dt. \quad (11)$$

Существующая методика определения долговечности является необъективной, так как при расчете

начальная надежность ДП задается из нормативных документов. Для объективной оценки долговечности необходимо произвести расчет вероятности безотказной работы дорожного покрытия на каждом участке дорожной сети.

В качестве случайных величин для оценки долговечности дорожного покрытия принимаются модули упругости $E_{общ}$ и $E_{мин}$ [5].

Надежность асфальтобетонного ДП как нежесткой дорожной одежды определяется по допускаемому упругому прогибу:

$$E_{общ} \geq E_{мин} \cdot K_{пр.треб}, \quad (12)$$

где $E_{общ}$ – общий расчетный модуль упругости конструкции ДП (КДП), МПа; $E_{мин}$ – минимальный требуемый общий модуль упругости ДП, МПа; $K_{пр.треб}$ – требуемый коэффициент прочности ДП по критерию упругого прогиба, $K_{пр.треб} = 1,17$ [2].

Величина минимального требуемого общего модуля деформации КДП вычисляется по эмпирической формуле [5]:

$$E_{мин} = 98,65 \cdot [\lg(\sum N_p) - c], \text{ МПа}, \quad (13)$$

где $\sum N_p$ – суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы ДП; c – эмпирический параметр, принимаемый для разных нагрузок на ось транспортного средства. Для максимальной расчетной нагрузки на ось 100 кН (при облегченном типе ДП) $c = 3,55$.

Для определения долговечности для каждого участка дорожной сети необходимо определить величину минимального требуемого общего модуля деформации КДП $E_{мин}$. Для этого необходимо вычислить суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы ДП на каждом участке сети согласно [3], в следующей последовательности.

Вначале определяется перспективная интенсивность движения на конец межремонтного периода $N_{пер}$, по формуле [3]:

$$N_{пер} = N_{исх} \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right)^t, \quad (14)$$

где $N_{исх}$ – исходная интенсивность движения, авт./сут; p – ежегодный прирост интенсивности движения, %; t – перспективный период, годы.

Затем определяется приведенная к расчетному двухосному автомобилю интенсивность движения N_p [3]:

$$N_p = f_{пол} \sum_{m=1}^n N_m * S_{m,сум} \text{ груз. ед./сут}, \quad (15)$$

где $f_{пол}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним; n – общее число различных марок транспортных средств в составе транспортного потока; N_m – интенсивность движения транспортных средств m -ой марки (число проездов в сутки в обоих направлениях транспортных средств m -ой

марки); $S_{m,сум}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства m -й марки [3].

Коэффициент многополосности $f_{пол}$ назначают по таблице 3.2 [3]. Номер полосы проезжей части отсчитывается справа по ходу движения автомобилей в одном направлении. Для двухполосных дорог $f_{пол} = 0,55$.

Далее находят суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности полотна дороги за срок службы по формуле [3]:

$$\sum N_p = 0,7 \cdot N_p \frac{K_c}{q^{(T_{сл}-1)}} \cdot T_{под} \cdot K_n, \quad (16)$$

где q – показатель изменения интенсивности движения по годам; $T_{сл}$ – расчетный срок службы; K_c – коэффициент суммирования; $T_{под}$ – расчетное число дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости полотна дороги; K_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого.

Расчетный срок службы $T_{сл}$ задают по таблице П6.2 [3].

Коэффициент суммирования K_c определяют по формуле [3]:

$$K_c = \frac{q^{T_{сл}} - 1}{q - 1}. \quad (17)$$

Для Западной Сибири расчетное число дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости полотна дороги принимается $T_{под} = 130$ дней [3].

Коэффициент k_n , учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого находят по таблице 3.3 [3].

Имея данные по минимальному и общему расчетному модулю деформации ДП каждого участка дороги, можно определить [4,5]:

Среднее значение резерва несущей способности:

$$\bar{g} = \overline{E_{общ}} - \overline{E_{мин}}, \quad (18)$$

где $\overline{E_{общ}}$ – среднее значение общего расчетного модуля деформации КДП; $\overline{E_{мин}}$ – среднее значение минимально требуемого общего модуля деформации КДП.

Дисперсия резерва несущей способности:

$$S_g^2 = S_{E_{общ}}^2 + S_{E_{мин}}^2, \quad (19)$$

где $S_{E_{общ}}^2$ – дисперсия общего расчетного модуля деформации КДП; $S_{E_{мин}}^2$ – дисперсия минимально требуемого общего модуля деформации КДП.

Среднеквадратичное отклонение резерва несущей способности:

$$S_g = \sqrt{S_g^2} \quad (20)$$

где S_g^2 – дисперсия резерва несущей способности.

Индекс надежности:

$$\beta = \frac{\bar{g}}{S_g}, \quad (21)$$

где \bar{g} – среднее значение резерва несущей способности; S_g – среднее квадратичное отклонение резерва несущей способности.

И, наконец, вероятность безотказной работы, т.е. показатель надежности КДП:

$$P(\bar{g} \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (22)$$

где $\Phi(\beta)$ – значение функции Лапласа, показывающее вероятность попадания случайной величины, распределенной по нормальному закону, в заданный интервал.

Для определения средних значений модулей деформации используются коэффициенты вариации:

$$\overline{E_{общ}} = \frac{E_{общ}}{(1 - C_{E_{общ}})}; \overline{E_{мин}} = \frac{E_{мин}}{(1 + C_{E_{мин}})}, \quad (23)$$

где $C_{E_{общ}}$ – коэффициент вариации общего расчетного модуля деформации КДП, $C_{E_{общ}} \leq 0,2$; $C_{E_{мин}}$ – коэффициент вариации минимально требуемого модуля деформации КДП, $C_{E_{мин}} \leq 0,2$.

Дисперсии модулей деформации также определяются с помощью коэффициентов вариации [5]:

$$S_{E_{общ}}^2 = (C_{E_{общ}} * \overline{E_{общ}})^2; S_{E_{мин}}^2 = (C_{E_{мин}} * \overline{E_{мин}})^2. \quad (24)$$

5. Пример применения методологии к автодорожным сетям УрФО

Для оценки надежности и долговечности дорожного покрытия выбрана сеть автомобильных дорог (рис. 1), находящаяся на территории Свердловской, Тюменской и Курганской областей Уральского федерального округа (УрФО), которая обеспечивает наземным сообщением две областные столицы: Екатеринбург (миллионник) и Тюмень.

По дорожно-климатическому районированию автомобильная вся выбранная сеть расположена во 2-ой дорожно-климатической зоне, II подзоне, и поделена на следующие участки:

1) Главная трасса Р-351 направление Екатеринбург-Тюмень через промежуточные населенные пункты: Белоярский – Богданович – Камышлов – Пышма – Талица – Тугулым – Успенка (протяженность 330 км). Интенсивность движения – 7980 авт./сут.

2) Северное второстепенное направление Екатеринбург-Тюмень через промежуточные населенные пункты: Артемовский – Зайково – Ирбит – Туринск – Тавда – Велижаны (протяженность 500 км). Интенсивность движения – 5100 авт./сут.

3) Южное второстепенное направление Екатеринбург-Тюмень через промежуточные населенные пункты: Каменск-Уральский – Катайск – Далматово – Мехонское

– Исетское (протяженность 432 км). Интенсивность движения – 6520 авт./сут.

4) Направление Рефтинский – Асбест – Белоярский (протяженность 57 км). Интенсивность движения – 450 авт./сут.

5) Направление Рефтинский – Сухой Лог – Богданович (протяженность 61 км). Интенсивность движения – 690 авт./сут.

6) Направление Зайково – Камышлов (протяженность 81 км). Интенсивность – движения – 750 авт./сут.

7) Направление Ирбит – Байкалово – Талица (протяженность 110 км). Интенсивность движения – 800 авт./сут.

8) Направление Туринская Слобода – Тюмень (протяженность 110 км). Интенсивность движения – 2100 авт./сут.

9) Направление Байкалово – Туринская Слобода (протяженность 49 км). Интенсивность движения – 1000 авт./сут.

10) Направление Артемовский – Буланаш – автодорога Зайково-Камышлов (протяженность 73 км). Интенсивность движения – 400 авт./сут.

11) Направление Белоярский – Каменск-Уральский (протяженность 72 км). Интенсивность движения – 600 авт./сут.

12) Направление Камышлов – Далматово (протяженность 80 км). Интенсивность движения – 550 авт./сут.

13) Направление Шатрово – автодорога южного направления Екатеринбург – Тюмень (протяженность 22 км). Интенсивность движения – 300 авт./сут.

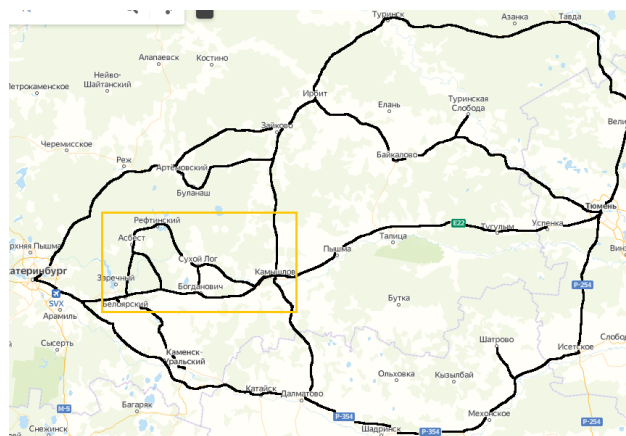


Рис. 1. Основная дорожная сеть с выделенной зоной сети второстепенных автодорог в УрФО

По приведенной выше методике произведен расчет всех необходимых параметров износа ДП каждого участка автодорожной сети, результаты которых показаны в работе [13].

По полученным результатам вычислена начальная надежность P (вероятность безотказной работы конструкции ДП в момент начала эксплуатации дороги после очередного ремонта) каждого участка дорожной сети, которая необходима для вычисления ДДП.

Из основной дорожной сети выделен прямоугольник 100x50 км, в котором отображены все второстепенные дороги, примыкающие к основной сети (см. рис.). Сеть второстепенных дорог имеет 30 узлов и 37 звеньев.

Для оценки максимально возможного влияния ДТП на пропускную способность основного маршрута исследуемой автодорожной сети было смоделировано дорожно-транспортное происшествие в 9:00 (когда вся транспортная сеть максимально загружена транспортными средствами) на главной трассе Р-351 направления Екатеринбург-Тюмень в н.п. Грязновское, с участием бензовоза, приведшее к возникновению пожара и взрыву, с последующим разрушением мостового сооружения, что сделало невозможным дальнейшее передвижение автомобилей по данной дороге до момента полного восстановления моста [13].

Использование агент-ориентированной модели для анализа последствий аварии показало, что ДТП привело к существенному снижению скорости передвижения транспортных средств и их скоплению, которое напрямую зависит от скорости движения автомобилей. Средняя скорость движения потока при нормальном функционировании транспортной сети составляет 57,5 км/ч [11].

Разрушение моста в результате ДТП и невозможность проезда по данному участку дороги привели к удлинению пути по главной трассе Р-351 на 85 км (с учетом объездных путей). Максимальное время объезда разрушенного участка дороги по объездным путям $t_1 = S/V = 85/30 = 2,8$ ч, где S – длина объездного пути, км; V – средняя скорость движения по объездному пути, км/ч.

Длина объезжаемого участка дороги равна 39 км. При условии полной работоспособности данного участка дороги время проезда по нему t_2 со средней скоростью 57,5 км/час равно 0,7 часа. Временные потери при объезде разрушенного участка дороги $\Delta t = t_1 - t_2 = 2,8 - 0,7 = 2,1$ час. Таким образом, время в пути по трассе Р-351 направления Екатеринбург-Тюмень при разрушении моста в н.п. Грязновское увеличивается на 2,1 часа.

Для более точного расчета вероятности разрушения дорожного покрытия и времени до следующего ремонта необходимо учитывать все факторы, влияющие на износ ДП. В связи с этим необходимо проанализировать влияние каждого события на вероятность наступления отказа КДП. Одним из перспективных методов оценки и прогнозирования отказа какой-либо системы с большим количеством причинно-следственных связей между событиями являются сети Байеса (БС). БС представляют собой графические модели, которые описывают вероятностные отношения между набором переменных. Формально они являются ориентированными ациклическими графами (DAG), узлы которых представляют переменные, относящиеся к системе, а дуги направленного действия представляют вероятностные зависимости между переменными [12].

Моделирование системы с причинно-следственными связями позволяет глубже понять основные механизмы ее деградации и изучать, как внешние вмешательства влияют на систему. В данной статье для этой цели был использован ПК «GeNIeModeler» (далее «GeNIe»). В качестве факторов, влияющих на вероятность отказа ДП, в данной работе приняты ударные воздействия, внешние воздействия, механические повреждения и человеческий фактор.

При построении модели БС для определения вероятности разрушения КДП необходимо понимание обстоятельств, приводящих к разрушению объекта. Ввиду слабо развитой системы мониторинга дорожных сетей необходимая статистика разрушений ДП отсутствует, поэтому условные вероятности наступления отказа КДП заданы экспертно.

Вероятности отказа (ВО) КДП на каждом участке автодорожной сети до времени следующего капитального ремонта с использованием ПК «GeNIe» представлены в работе [13].

По полученным результатам наибольшую ВО конструкции дорожного полотна имеет участок автодорожной сети №9 (31,76%) направления Байкалово – Туринская Слобода.

Сообщение между Екатеринбургом и Тюменью обеспечивается шестью путями с соответствующими вероятностями отказа Q :

- 1) главная трасса Р-351 ($Q = 28,18\%$);
- 2) северное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 28,75\%$);
- 3) южное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 29,43\%$);
- 4) северное направление через населенные пункты Байкалово и Туринская слобода ($Q = 48,13\%$);
- 5) северное направление через населенные пункты Зайково и Камышлов с выездом на главную трассу Р-351 ($Q = 63,97\%$);
- 6) главная трасса Р-351 через населенные пункты Камышлов и Далматово с выездом на дорогу южного направления ($Q = 61,3\%$).

Надежность рассматриваемой транспортной сети в этом случае равна:

$$R_{\text{сети}} = 1 - 0,2818 \cdot 0,2875 \cdot 0,2943 \cdot 0,4813 \cdot 0,6397 \cdot 0,613 = 0,9955. \quad (25)$$

Необходимо отметить, что не все шесть маршрутов могут обеспечить бесперебойное движение большегрузных транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн. Это связано с тем, что некоторые маршруты ввиду недостаточной ширины проезжей части и наличия слабых мест (мостов с пониженной грузоподъемностью) не могут пропустить через себя транспортные средства большой грузоподъемности. По этим причинам маршруты № 4 и 6 не могут обеспечить передвижение транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн, поэтому надежность транспортной сети по маршруту

Екатеринбург-Тюмень в таком случае будет определяться четырьмя путями:

- 1) главная трасса Р-351 ($Q = 28,18\%$);
- 2) северное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 28,75\%$);
- 3) южное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 29,43\%$);
- 4) северное направление через населенные пункты Зайково и Камышлов с выездом на главную трассу Р-351 ($Q = 63,97\%$);

Надежность сети относительно большегрузных транспортных средств равна:

$$R_{сети} = 1 - 0,2818 \cdot 0,2875 \cdot 0,2943 \cdot 0,6397 = 0,9847. \quad (26)$$

Расчет надежности сети показывает, что чем большим количеством путей организован выбранный маршрут, тем его надежность выше, соответственно, и выше надежность всей транспортной сети.

Результаты расчета остаточного ресурса (в годах) каждого участка рассматриваемой автодорожной сети по критерию снижения модуля деформации КДП (образование ям на проезжей части) представлены в работе [13]. Предельно допустимый (критический) размер ямы на проезжей части: длина – 60 см, ширина – 15 см, глубина – 5 см.

Одним из видов отказа КДП является образование колеи на проезжей части, так как данное событие также является следствием снижения модуля деформации КДП во время эксплуатации. В работе [13] представлен расчет остаточного ресурса каждого участка транспортной сети по критерию образования продольной колеи, глубина которой превышает предельно допустимое значение, равное 35 мм.

Заключение

В статье предложена методика расчета долговечности и остаточного ресурса по критериям образования ям и продольной колеи в дорожном покрытии, и надежности региональной сети автодороги по допускаемому остаточному прогибу, возникающему из-за снижения приведенного модуля деформации КДП в результате многочисленной упруго-пластической деформации ДП под действием трафика.

Для определения ВО каждого участка дорожной сети разработана методика определения начальной надежности (вероятности безотказной работы, ВБР) с учетом ударных воздействий (нагрузки на ДП от проезжающих транспортных средств), внешних (атмосферных) воздействий и человеческого фактора (нарушение методики укладки асфальтобетона), с использованием Байесовских сетей в формате ПК «GeNie».

Применение разработанной методики к оценке функциональной надежности маршрута Екатеринбург-Тюмень, возможного шестью путями, показало, что его надежность для обычного транспорта равна 99,55%, а

для транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн равна 98,47%.

Использование агент-ориентированной модели поведения водителей для оценки и анализа уязвимости транспортной сети Екатеринбург-Тюмень УрФО при отказе главной дороги из-за аварийного разрушения моста показало, что чем сильнее развита транспортная сеть, тем она робастнее.

Самыми уязвимыми участками транспортной сети Екатеринбург-Тюмень с точки зрения износа дорожного покрытия являются участок сети №9 направления Байкалово – Туринская Слобода (ВБР 68,24%, минимальный срок безотказной работы 4,5 года по критерию образования ям) и участок сети №10 направления Артемовский – Буланаш (время образования продольной колеи 4,39 года, при вероятности отказа 68,42%).

Список литературы

1. Баринев Е.Н. Оценка и прогнозирование долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий: Учеб. Пособие. СПб.: Инж.-строит. Ин-т СПб, 1993. 66 с.
2. ОДН 218.1.052-2002 Отраслевые дорожные нормы. Оценка прочности нежестких дорожных одежд. М.: 2002. 60 с.
3. ОДН 218.046-01 Отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: 2001. 99 с.
4. Моисеенко Р.П., Ефименко В.Н. К оценке долговечности автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 207–213.
5. Моисеенко Р.П., Пушкарева Г.В., Акимов Б.Г. Расчет надежности нежестких дорожных одежд методом моментов по критерию допускаемого прогиба // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 220-226.
6. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Сильянов, Э.Р. Домке. 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 352 стр.
7. Feng K., Li Q., Ellingwood B.R. Post-earthquake modelling of transportation networks using an agent-based model // Structure and Infrastructure Engineering. 2020. DOI: 10.1080/15732479.2020.1713170
8. Тимашев С.А., Бушинская А.В., Малюкова М.Г. и др. Целостность и безопасность трубопроводных систем. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 590 с.
9. Описание района строительства [Электронный ресурс]. URL: https://studbooks.net/2441945/tehnika/opisanie_rayona_stroitelstva (Дата обращения 30.04.2021).
10. Критерии надежности дорожной одежды [Электронный ресурс]. URL: https://road-project.okis.ru/files/8/3/6/836/DO/5_DO_Nadezjnost.pdf (Дата обращения 07.02.2021).

11. ОДМ 218.2.020-2012 Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. М.: 2012. 148 с.

12. Тулупьев А.Л. Байесовские сети: Логико-вероятностный подход. СПб.: Наука, 2006. 607 с.

13. Пономарев В.А. Мейтенанс сети автодорог региона по критерию риска на основе цифрового мониторинга их нагруженности и износа : магистерская дис. ... / В.А. Пономарев. Екатеринбург, 2021. 123 с.

References

1. Barinov E.N. [Assessing and predicting the durability of asphalt concrete road surfaces: a textbook]. St. Petersburg: St. Petersburg Engineering and Construction Institute; 1993. (In Russ.)

2. [ODN 218.1.052-2002 Industry road standards. Strength assessment of flexible road surfaces]. Moscow: 2002. (In Russ.)

3. [ODN 218.046-01 Industry road standards. Design of flexible road surfaces]. Moscow: 2001. (In Russ.)

4. Moiseenko R.P., Efimenko V.M. [Towards durability of automobile roads]. *Journal of Construction and Architecture* 2019;21(3):207-213. (In Russ.)

5. Moiseenko R.P., Pushkaryova G.V., Akimov B.G. Reliability analysis of flexible pavements using moments method and bending strain criterion. *Journal of Construction and Architecture* 2017;6:220-226. (In Russ.)

6. Silyanov V.V., Domke E.R. [Transport and operational qualities of motorways and city streets: a textbook for higher educational institutions. 2-nd ed., reprinted]. Moscow: Publishing Centre Academy; 2008. (In Russ.)

7. Feng K., Li Q., Ellingwood B.R. Post-earthquake modelling of transportation networks using an agent-based model. *Structure and Infrastructure Engineering*; 2020. DOI: 10.1080/15732479.2020.1713170.

8. Timashev S.A., Bushinskaya A.V., Malyukova M.G. et al. [Integrity and safety of pipeline systems]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013. (In Russ.)

9. [Description of a construction site]. (accessed: 30.04.2021). Available at: https://studbooks.net/2441945/tehnika/opisanie_rayona_stroitelstva. (In Russ.)

10. [Dependability criteria of road surfaces]. (accessed: 07.02.2021). Available at: https://road-project.okis.ru/files/8/3/6/836/DO/5_DO_Nadezjnost.pdf. (In Russ.)

11. [ODM 218.2.020-2012 Industry road guidance document. Guidelines for assessing the capacity of motorways]. Moscow; 2012. (In Russ.)

12. Tulupyev A.L. [Bayesian networks: a probabilistic logic-based approach]. St. Petersburg: Nauka; 2006. (In Russ.)

13. Ponomarev V.A. [Risk-based maintenance of a regional road network based on digital monitoring of its loading and wear : a master's dissertation]. Yekaterinburg; 2021. (In Russ.)

Сведения об авторах

Тимашев Святослав Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, научный руководитель и главный научный сотрудник Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, профессор кафедры САПРОС Института строительства и архитектуры Уральского федерального университета, Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: timashevs@gmail.com

Пономарев Василий Анатольевич – аспирант Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, инженер-проектировщик ООО «Геотехпроект», Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: wasilko@rambler.ru

About the authors

Sviatoslav A. Timashev, Doctor of Engineering, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Scientific Director and Principal Scientist, Research and Engineering Centre Reliability and Service Life of Large-Scale Systems and Machines, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor, SAPROS Department, Institute of Construction and Architecture, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: timashevs@gmail.com

Vasilii A. Ponomarev, Postgraduate Student, Research and Engineering Centre Reliability and Service Life of Large-Scale Systems and Machines, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Design Engineer, Geotekhprouekt Limited Liability Company, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: wasilko@rambler.ru

Вклад авторов в статью

Тимашев Святослав Анатольевич. Разработка идеи исследования надежности и уязвимости автотранспортных систем на основе следующих факторов риска: влияние суровых климатических условий, систематические динамические воздействия и человеческий фактор.

Пономарев Василий Анатольевич. Описание и структурирование методов исследования, выполнение расчетов с последующим описанием полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Уважаемые коллеги!

В классической теории надежности и моделировании отказов экспоненциальное распределение долгое время остается одним из основных инструментов, позволяющим строить простые, элегантные и часто достаточно точные модели для широкого класса систем – от электронных компонентов до сложных технических устройств. Во многих случаях, особенно когда условия эксплуатации стационарны, а факторы износа распределены равномерно, экспоненциальная модель действительно является удобной и адекватной.

Однако реальность часто оказывается сложнее идеализированных предположений. В практике инженерных расчетов, экологических и социальных исследований мы все чаще сталкиваемся с системами, работающими в нестационарных, циклически меняющихся условиях: суточные или сезонные колебания нагрузки, изменение внешней среды и т.д. В таких ситуациях классическое экспоненциальное распределение может давать значительные погрешности, так как не учитывает периодичность и селективность в процессах старения и восстановления.

Именно здесь на первый план выходит необходимость в более гибких и адекватных вероятностных моделях – таких, которые сохраняют математическую строгость, но при этом способны отражать дискретную природу «забывания» в определенные моменты времени. Таким классом распределений являются распределения с почти отсутствием памяти (ALM-распределения), которые рассматриваются в представленной вашему вниманию статье Б. Димитрова.

ALM-распределения не отменяют экспоненциальную модель, а расширяют ее, предлагая инструмент для работы с системами, где свойство отсутствия памяти проявляется не непрерывно, а лишь в дискретные моменты, кратные некоторому заданному периоду. Это позволяет точнее моделировать наработку на отказ, интенсивность отказов и время восстановления в условиях периодических нагрузок и нестационарных сред.

Данная статья представляет собой систематизированный обзор теоретических основ, свойств и приложений ALM-распределений, подтвержденный графическими иллюстрациями и статистическими методами. Мы уверены, что этот материал будет полезен не только теоретикам, но и практикам, сталкивающимся с задачами моделирования надежности в реальных, неидеальных условиях.

Редколлегия журнала «Надежность»

Распределения, обладающие свойством почти отсутствия памяти (ALM) и их приложения

The Almost Lack of Memory (ALM) distributions and their applications

Димитров Б.¹
Dimitrov B.¹

¹ Инженерно-управленческий институт GMI (ныне Университет Кеттеринга), Флинт, Мичиган, США

¹ GMI Engineering and Management Inst. (now Kettering), Flint, Michigan, USA

dimitrob@gmail.com



Димитров Б.

Резюме. Данная статья обобщает фундаментальные исследования, посвященные классу вероятностных распределений, известных как **распределения с почти отсутствием памяти (ALM)**. В то время как классическое экспоненциальное распределение однозначно характеризуется свойством отсутствия памяти в любом возрасте, распределения ALM проявляют это свойство выборочно, в возрастах, образующих дискретную последовательность $\{0, c, 2c, \dots\}$ для положительной константы c . Это обобщение предоставляет мощный и универсальный аппарат для моделирования времени жизни, времени до отказа и времени ожидания в **периодических, нестационарных условиях**. Мы представляем всестороннюю характеристику распределений ALM через несколько эквивалентных свойств: специфическую аналитическую форму функции распределения, периодическую интенсивность отказов и вероятностное представление, в котором случайная величина разлагается в сумму усеченной на $[0, c)$ компоненты и геометрически распределенной компоненты, масштабированной на c . Это разложение имеет ключевое значение как для теоретического анализа, так и для практических приложений. Строго устанавливается внутренняя связь между распределениями ALM и **периодическими неоднородными пуассоновскими процессами**. Кроме того, в статье рассматриваются важные статистические аспекты, включая оценку параметров методами максимального правдоподобия и моментов, а также проверку гипотез для различения моделей. Применимость теории ALM демонстрируется в различных областях, включая надежность технических систем, работающих в условиях циклических нагрузок, страхование для моделирования убытков с сезонной структурой и науки об окружающей среде для изучения явлений, управляемых периодическими силами. Заполняя пробел между теоретической вероятностью и необходимостью моделирования реальной периодичности, распределения ALM предлагают надежный и математически элегантный инструмент для анализа в нестационарных условиях.

Abstract. This article generalizes fundamental research devoted to a class of probability distributions known as Almost Lack of Memory (ALM) distributions. While the classical exponential distribution is uniquely characterized by the lack of memory property at any age, ALM distributions exhibit this property selectively, at ages forming a discrete sequence $\{0, c, 2c, \dots\}$ for a positive constant c . This generalization provides a powerful and versatile tool for modeling lifetimes, times to failure, and waiting times under periodic, non-stationary conditions. We present a comprehensive characterization of ALM distributions through several equivalent properties: a specific analytical form of the distribution function, a periodic failure rate, and a probabilistic representation in which a random variable decomposes into the sum of a component truncated on $[0, c)$ and a geometrically distributed component scaled by c . This decomposition is of key importance for both theoretical analysis and practical applications. The intrinsic connection between ALM distributions and periodic non-homogeneous Poisson processes is rigorously established. Furthermore, the article discusses important statistical aspects, including parameter estimation by maximum likelihood and method of moments, as well as hypothesis testing for model discrimination. The applicability of ALM theory is demonstrated in various fields, including the reliability of technical systems operating under cyclic loads, insurance for modeling losses with a seasonal structure, and environmental sciences for studying phenomena driven by periodic forces. Bridging the gap between theoretical probability and the need for modeling real-world periodicity, ALM distributions offer a robust and mathematically elegant tool for analysis under non-stationary conditions.

Ключевые слова: характеристика вероятностных распределений, функциональные уравнения, страхование, математическое моделирование, нестационарные случайные процессы, периодичность, надежность

Keywords: characterization of probability distributions, functional equations, insurance, mathematical modeling, non-stationary random processes, periodicity, reliability

Для цитирования: Димитров Б. Распределения, обладающие свойством почти отсутствия памяти (ALM) и их приложения // Надежность. 2026. №2. С. 34-44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-34-44>

For citation: Dimitrov B. The almost lack of memory (ALM) distributions and their applications. Dependability 2026;2: 34-44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-34-44>

Поступила: 02.12.2025 / **После доработки:** 10.01.2026 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 02.12.2025 / **Revised on:** 10.01.2026 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Давно замечательный французский математик **Огюстен-Луи Коши (1789 – 1857)** доказал в 1821 году, что если функциональное уравнение $f(x+y)=f(x) \cdot f(y)$ выполняется для любых неотрицательных аргументов x и y , то функция $f(x)$ является экспоненциальной $f(x)=e^{cx}$, где c – вещественная константа. В приложениях надежности вероятностное свойство некоторых случайных времен жизни X технических единиц выглядит как $P\{X \geq x+y\} = P\{X \geq x\} \cdot P\{X \geq y\}$. Из теоремы Коши и вероятностных интерпретаций следует, что функция распределения времени жизни имеет вид $P\{X \geq x\} = e^{-cx}$. И следует, что если этот элемент все еще работает (жив в возрасте y), то шансы остаться работоспособным дополнительное время x такие же, как когда он только начал функционировать:

$$P\{X \geq x + y | X \geq y\} = P\{X \geq x\}.$$

Обычное объяснение этого свойства известно как свойство Отсутствия Памяти (LM) в любом возрасте y . Это означает, что в любом возрасте y элементы с экспоненциально распределенным временем жизни теряют память о своем текущем возрасте и ведут себя как новые. Это характеристическое свойство, которое помогает на практике распознать экспоненциально распределенное время жизни технических изделий. Обычно это верно для изделий, созданных из большого числа высоконадежных компонентов.

В серии работ с многочисленными коллегами (см., пожалуйста, список литературы) мы сосредоточили внимание на аналогичных свойствах, которые могут быть использованы на практике для распознавания распределения времени жизни технических изделий. И мы обнаружили, что если время жизни проявляет отсутствие памяти в данном возрасте c , то оно будет терять память в любом возрасте mc , кратном константе c . Применяя это бесконечно много раз $m=2,3,4,\dots$, мы назвали эти распределения ALM-распределениями. И мы нашли математическую форму этого класса вероятностных распределений, установили многочисленные математические предствления, физические свойства и нашли различные практические приложения.

Здесь мы представляем некоторые результаты различных аналитических, физических и математических описаний ALM-распределений и областях их применения.

1. Нестационарность и периодичность. Математическое представление

Публикации [1], [2] и [8] иллюстрируют наши исследования, где мы анализировали характеристики процессов, которые не меняют свое поведение (вероятностное распределение), когда время жизни основного рабочего инструмента конечно из-за отказов. И мы использовали это свойство, мы получили некоторые функциональные уравнения, позже доказанные как характеризующие экспоненциальное или геометрическое распределение. В [3] наша попытка охарактеризовать геометрическое распределение, когда это время жизни является фиксированной константой, привела к тому, что д-р Чукова предоставила нам контрпример, где инвариантное свойство выполняется, а время жизни не является геометрическим. Это был первый пример ALM-распределения. Затем мы начали анализировать непрерывные распределения с другими заинтересованными коллегами и нашли результаты, которые я кратко представляю в этой своей работе.

1.1. Периодичность. Математическое описание

Периодичность обычно наблюдается в условиях окружающей среды, сопровождающих реальные жизненные явления. Это и мотивирует наши исследования. Примеров много: периодическое чередование холодных и теплых эпох на Земле; периодическое чередование солнечной активности; периодические приливы (Эль-Ниньо и Ла-Нинья); периодические выборы в государствах и крупных организациях; периодическое предписанное техническое обслуживание в системе (технической или социальной), сезонная периодичность и т.д. Мы называем времена окончания каждого чередования точками регенерации и даем в [9], [12], [13] следующее математическое описание этих процессов.

Временным процессом мы называем любую количественно измеряемую переменную, которая может быть измерена в любой момент времени. Мы называем *точечным процессом* упорядоченную последовательность моментов $\{T_n : T_n < T_{n+1}; n = 1, 2, \dots\}$ наступления событий. Процесс

$$N(t) = \max n : T_n < t, \quad (1)$$

подсчитывающий число событий, произошедших в интервале $[0;t)$, называется *счетчиком* точечного процесса. Среднее число $\Lambda(t) = EN(t)$ событий в интервале $[0;t)$

называется *функцией интенсивности* точечного процесса. Ее производная $\lambda(t) = \Lambda'(t)$ (предполагается, что она существует) называется *плотностью интенсивности* или просто *интенсивностью* процесса. Эту функцию мы интерпретируем как сенсор (нерв) процесса, реагирующий на окружающие условия в момент времени t .

Если *интервалы между моментами наступления событий*

$$X_n = T_n - T_{n-1}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad T_0 = 0$$

образуют последовательность одинаково распределенных независимых случайных величин, процесс называется *рекуррентным* или *процессом восстановления*. Такой процесс и его счетная переменная $N(t)$ однозначно порождаются соответствующей последовательностью $\{X_n\}$ одинаково распределенных независимых случайных величин соотношением

$$T_n = \sum_{i=1}^n X_i, \quad T_0 = 0.$$

Большинство результатов в теории массового обслуживания и стохастических сетей были получены в рамках этого предположения и относятся к стационарному режиму работы систем, т.е. характеризуют производительность системы «на бесконечности», т.е. при $t \rightarrow \infty$, удовлетворяют соотношению

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Lambda(t)}{\mathbf{E}[X_n]t} = 1.$$

Мы предполагаем $\Lambda(t) = \mathbf{E}N(t)$ конечной для любого времени $t > 0$. И поскольку условия окружающей среды периодически чередуются, реагирующая функция интенсивности $\lambda(t)$ является периодической. Существует константа $c > 0$, равная средней длине $\mathbf{E}(X_n)$ интервалов чередования условий, тогда должно выполняться

$$\lambda(t+c) = \lambda(t) \quad \text{для всех } t \geq 0.$$

Мы используем связь между функциями интенсивности отказов и распределением вероятностей случайной величины, представляющей время жизни индивидов, помещенных в некоторые периодические условия окружающей среды. Так мы пришли к концепции ALM-распределений. Мы изучали их физические интерпретации и обсуждали их аналитические и вероятностные свойства. Каждая целочисленная зависящая от времени случайная величина N_t интерпретируется как нестационарный процесс Пуассона с функцией интенсивности $\lambda(t)$. Далее результаты суммируют то, что следует из теории вероятностей и интерпретации математических соотношений и их смысла. Эти соотношения используются в характеристизации периодического пуассоновского процесса с переменной во времени интенсивностью в терминах его порождающей случайной величины X , которая, между прочим, обладает свойством частичного отсутствия памяти. В [41] установлены статистические оценки параметров и способы проверки гипотез для ALM-распределений на основе наблюдений за соответствующим процессом. Мы опишем это позже в этой статье.

1.2. Связанные математические выражения и вероятностный смысл

Класс ALM-распределений характеризуется следующим свойством.

Неотрицательная ненулевая случайная величина X называется лишенной памяти в точке $c > 0$, если

$$\mathbf{P}\{X \geq c+x | X \geq c\} = \mathbf{P}\{X \geq x\} \quad \text{для всех } x \geq 0. \quad (2)$$

Интерпретация этого уравнения для условной вероятности такова: если индивид имеет случайное время жизни X и жив в возрасте c , то шансы, что он проживет дополнительное время длины x , такие же, как исходные шансы прожить ту же длительность x жизни. Из-за этого это называется *Свойством Отсутствия Памяти в возрасте c* . И мы математически доказали, что если случайная величина X обладает свойством отсутствия памяти в возрасте $c > 0$, то она обладает отсутствием памяти во всех точках времени из последовательности $\{c_m = mc\}_{m=0}^{\infty}$. Поскольку этих времен бесконечно много, мы назвали такие распределения ALM-распределениями. И мы нашли, что следующие утверждения эквивалентны:

Функция распределения ALM-с.в. X имеет вид

$$F_x(x) = 1 - a^{\lfloor x/c \rfloor} (1 - (1-a)F_y(x - \lfloor x/c \rfloor c)), \quad (3)$$

где $a = \mathbf{P}\{X \geq c\}$, а $F_y(\cdot)$ – функция распределения случайной величины Y , сосредоточенной на интервале $[0, c)$.

(ii) Плотность распределения $f_x(x)$, $x \geq 0$, непрерывной случайной величины X имеет вид

$$f_x(x) = (1-a)a^{\lfloor x/c \rfloor} f_y(x - \lfloor x/c \rfloor c), \quad (4)$$

где $a = \mathbf{P}\{X \geq c\}$, а $f_y(\cdot)$ – плотность распределения непрерывной случайной величины Y с носителем $[0, c)$. Распределение $f_x(x)$ дискретной случайной величины X определяется той же формулой, где $f_y(\cdot)$ – распределение дискретной случайной величины с носителем $\{0, 1, \dots, c-1\}$.

(iii) Интенсивность возникновения событий

$$\lambda_x(x) = \frac{(1-a)f_y(x - \lfloor x/c \rfloor c)}{1 - (1-a)F_y(x - \lfloor x/c \rfloor c)}$$

для случайной величины X является периодической функцией с периодом c .

(iv) Случайная величина X может быть выражена как

$$X = Y_c + cZ, \quad (5)$$

где Y_c и Z – независимые случайные величины. С.в. Y_c имеет носитель внутри интервала $[0, c)$, а с.в. Z имеет геометрическое распределение с параметром a , $\mathbf{P}(Z=k) = (1-a)a^k$, $k=0, 1, \dots$

Заметим, что свойство (iv) содержит эквивалентное представление для класса ALM-распределений, которое полезно при моделировании этих распределений.

Наконец, связь между периодическим пуассоновским процессом с переменной во времени интенсивностью и классом ALM-распределений может быть объяснена следующим образом: Случайная величина X , порождающая поток Пуассона с переменной интенсивностью, имеет

распределение с отсутствием памяти. Обратное, любая случайная величина, имеющая ALM-распределение, порождает периодический пуассоновский поток с переменной интенсивностью процедурой записи.

Процесс, порождающий случайную величину X , имеет распределение, которое для $mc \leq t < (m+1)c$ может быть выражено как

$$F_X(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t \lambda(u) du\right\} = 1 - \left[\exp\left\{-\int_0^c \lambda(u) du\right\}\right]^m \exp\left\{-\int_0^{t-mc} \lambda(u) du\right\} = 1 - a^m (1 - F(t - mc)),$$

что при $a = \exp\left\{-\int_0^c \lambda(u) du\right\}$ совпадает с (3).

С другой стороны, интенсивность возникновения события случайной величины X с ALM-распределением является периодической функцией, и, как следствие соотношения (3), соответствующий пуассоновский поток с переменной интенсивностью является периодическим. Эти свойства оказались очень удобными в приложениях, как показано в [12], [13], [16], [20], [26] и других.

1.3. Статистика

Теперь мы опишем некоторые статистические свойства ALM-распределений.

1.3.1. Оценка параметров

Параметры ALM-распределения могут быть оценены либо методом максимального правдоподобия, либо методом моментов; оба дают одинаковые результаты [9]–[12]. Нам не удалось оценить параметр c . В приложениях он обычно определяется из «физических» соображений. Поэтому, предполагая, что он известен, мы покажем, что простая оценка для параметра a может быть получена методом моментов. Как известно, выборочное среднее

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

выборки X_1, \dots, X_n является наилучшей оценкой математического ожидания случайной величины. Из представления (5) получаем

$$\mu_X = EX = EY + cEZ = \mu_Y + c \frac{a}{1-a}.$$

В этом соотношении, заменяя теоретические средние их выборочными аналогами, которые являются их оценками, получаем

$$\frac{\bar{X} - \bar{Y}}{c} = \frac{\hat{a}}{1 - \hat{a}} \quad \text{или} \quad \hat{a} = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{c \left(1 + \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{c}\right)} = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{c + \bar{X} - \bar{Y}},$$

где

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad \text{с} \quad Y_i = X_i - \left\lfloor \frac{X_i}{c} \right\rfloor c \quad \text{для} \quad mc \leq X_i < (m+1)c.$$

Аналогичная оценка получена в [9] методом максимального правдоподобия. Пусть $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ – порядковые статистики случайной выборки X_1, \dots, X_n из генеральной

совокупности с плотностью распределения (3). Функция правдоподобия имеет вид

$$l(x_1, \dots, x_n) = (1-a)^n a^{nk} \prod_{m=0}^r \prod_{j=1}^{k_{m+1}} f_Y(x_{(Z_m+j)} - mc). \quad (6)$$

Здесь k_m – число членов в выборке в интервале $[mc, (m+1)c)$, $Z_0=0$, $Z_m = \sum_{j < m} Z_j$, $\bar{z} = n^{-1} \sum_m m z_m$, и $r = \lfloor X_{(n)} / c \rfloor$. В [41] оценки других параметров ALM-распределений найдены методом максимального правдоподобия с использованием приведенной выше функции правдоподобия.

1.3.2. Проверка гипотез о ALM-распределениях. Моделирование

Интуитивно ясно, что ALM-распределения должны стремиться к экспоненциальному распределению, когда параметр $c \rightarrow 0$. Теперь мы дадим строгое доказательство этого утверждения.

Если $c \rightarrow 0$ и $a \rightarrow 1$ так, что $1-a \approx \lambda c$, где λ – положительная константа, то предел ALM-распределения является экспоненциальным распределением с параметром λ .

Преобразование Лапласа-Стилтьеса ALM-распределения имеет вид

$$\varphi_X(s) = \varphi_Y(s) \frac{1-a}{1-a \exp\{-cs\}}.$$

Здесь носитель случайной величины Y – интервал $[0, c]$, находим, что $\varphi_Y(s) \rightarrow 1$ при $c \rightarrow 0$. Второй множитель в выражении для $\varphi_X(s)$ удовлетворяет соотношению

$$\begin{aligned} \frac{1-a}{1-a \exp\{-cs\}} &= \frac{1-a}{1-a(1-cs + (cs)^2/2 - \dots)} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{cs}{1-a} + o(c)} \rightarrow \frac{1}{1 + \frac{s}{\lambda}} = \frac{\lambda}{\lambda + s}. \end{aligned}$$

Следовательно, переходя к пределу при $c \rightarrow 0$ в последнем выражении, поскольку $\frac{1-a}{c} \rightarrow \lambda$, мы приходим к утверждению теоремы. Это утверждение также подразумевается теоремой о непрерывной зависимости преобразований Лапласа-Стилтьеса и их оригиналов.

Согласно этим фактам, целесообразно использовать экспоненциальные распределения как конкурирующую гипотезу при изучении класса ALM-распределений с последовательностью $c_m = mc$. С другой стороны, параметр c часто известен из природы исследуемого явления. Поэтому есть основания для сравнения различных ALM-распределений для одного и того же значения параметра c и разных плотностей распределения на цикле. Предварительные результаты такого исследования сообщены в [41]. Ниже мы излагаем их обобщения и приводим примеры.

Пусть x_1, \dots, x_n – выборка из генеральной совокупности с неизвестной плотностью распределения $f(x)$. Рассмотрим задачу проверки нулевой гипотезы $H_0: f(x) = f_0(x)$ против альтернативной гипотезы $H_1: f(x) = f_1(x)$.

Согласно теореме Неймана-Пирсона, наиболее мощным критерием для проверки простой гипотезы H_0

против альтернативы H_1 является критерий отношения правдоподобий. Поскольку наблюдения независимы, критическая область для этого критерия может быть выражена как

$$W = \left\{ (x_1, \dots, x_n) : \frac{f_1(x_1, \dots, x_n)}{f_0(x_1, \dots, x_n)} = \prod_{i=1}^n \frac{f_1(x_i)}{f_0(x_i)} > t \right\}, t > 0. \quad (7)$$

Уровень значимости α и мощность π этого критерия равны

$$\alpha = P_{H_0} \{W\} = P_{H_0} \{(X_1, \dots, X_n) \in W\},$$

$$\pi = P_{H_1} \{W\} = P_{H_1} \{(X_1, \dots, X_n) \in W\}.$$

При вычислениях удобнее использовать натуральный логарифм произведения в (7). Для этой цели введем натуральный логарифм отношения правдоподобий, который для краткости называется статистикой критерия

$$W = \ln \prod_{i=1}^n \frac{f_1(x_i)}{f_0(x_i)} = \sum_{i=1}^n (\ln f_1(x_i) - \ln f_0(x_i)).$$

Применяя метод Монте-Карло, мы вычисляем критическое значение t_α для уровня значимости α и мощность π критерия. Подходящий алгоритм описан в [41]. Здесь мы опускаем детали.

1.4. Различные способы получения расширенных математических результатов

Многие вероятностные распределения (например, экспоненциальное, логистическое, равномерное, Парето, Маршала-Олкина и некоторые другие) характеризуются тем, что связанные математические выражения могут обладать свойством почти отсутствия памяти, если такое уравнение фиксирует другой класс вероятностных распределений, зависящий от параметра c . Это значение $y=c$, и предполагая его верным для всех x в его области R_1 , вы можете конструктивно получить ALM-распределения. Статьи [6, 7, 22, 25, 34, 36, 40] используют такой подход и получают интересные результаты. Мы рекомендуем молодым математикам его использовать. Там много возможностей проверить себя. В [6], [40] и [51] мы использовали такой подход в бивариатном функциональном уравнении, аналогичном (2), которое характеризует двумерное экспоненциальное распределение Маршала-Олкина, получили двумерное расширение класса ALM-распределений и изучили некоторые их свойства. В [7] и [22] мы использовали мультипликативный эквивалент уравнения Коши, который характеризует как равномерное, так и распределение Парето, и получили классы их искаженных эквивалентов. Расширение класса логистических распределений получено в [25]. Другие публикации, перечисленные в ссылках, анализируют различные приложения и характеристики ALM-распределений через свойства процессов в прикладных ситуациях. Мы хотели бы здесь особо сосредоточить ваше внимание на преобразовании

релевантности вероятностных распределений. Это распределение времени жизни системы, где наблюдение за одним элементом из набора аналогичных элементов одновременно начинают работать в одинаковых условиях. Когда наблюдаемый элемент отказывает, он немедленно заменяется другим элементом из набора все еще работающих (живых) элементов. Распределение длительности времени от начала до момента, когда отказывает второй элемент, является преобразованием релевантности исходного распределения времени жизни каждого элемента. Мы доказываем в [16], что совпадение преобразования релевантности с исходным временем жизни по распределению также характеризует класс ALM-распределений. На такой модели есть над чем поработать молодым вероятностникам, если им это нравится.

2. Графическая иллюстрация свойств ALM-распределений и их анализ

Для наглядной демонстрации свойств ALM-распределений построим серии графиков, иллюстрирующих ключевые характеристики данного класса распределений. Все графики построены для параметров $c=5$, $a=0,7$ и $\lambda_y=0,8$, где c – период распределения, $a=P(X \geq c)$ – вероятность «пережить» один период, а λ_y – параметр усеченного экспоненциального распределения на интервале $[0, c)$.

2.1. Плотность распределения ALM

На графике плотности распределения четко прослеживается периодическая структура ALM-распределения (рис. 1). Функция плотности имеет вид:

$$f_x(x) = (1-a)a^{\lfloor x/c \rfloor} f_y(x - \lfloor x/c \rfloor c),$$

где $f_y(y)$ – плотность усеченного экспоненциального распределения на $[0, c)$:

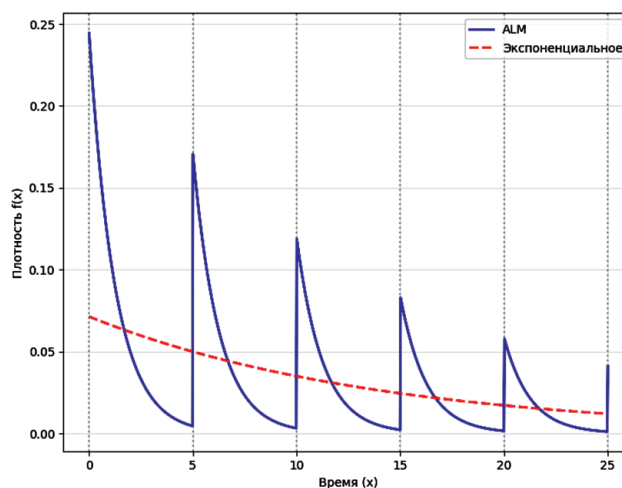


Рис. 1. Сравнение плотностей ALM и экспоненциального распределения

$$f_Y(y) = \frac{\lambda_y e^{-\lambda_y y}}{1 - e^{-\lambda_y c}}, \quad y \in [0, c).$$

Визуально наблюдаются регулярные пики в точках $x=0,5,10,15,\dots$, соответствующие началу каждого нового периода. Каждый блок длиной $c = 5$ демонстрирует идентичную форму плотности, что подтверждает периодическую природу распределения. Для сравнения приведена плотность экспоненциального распределения с параметром $\lambda = -\frac{\ln a}{c} \approx 0,0713$, которая монотонно убывает и не проявляет периодичности.

Такая структура плотности соответствует системам, испытывающим циклические нагрузки, где начало каждого периода связано с повышенной вероятностью отказа.

2.2. Функция распределения

Функция распределения ALM (рис. 2) имеет аналитическое выражение:

$$F_X(x) = 1 - a^{\lfloor x/c \rfloor} (1 - (1-a)F_Y(x - \lfloor x/c \rfloor c)),$$

где $F_Y(y)$ – функция распределения компоненты Y :

$$F_Y(y) = \frac{1 - e^{-\lambda_y y}}{1 - e^{-\lambda_y c}}, \quad y \in [0, c).$$

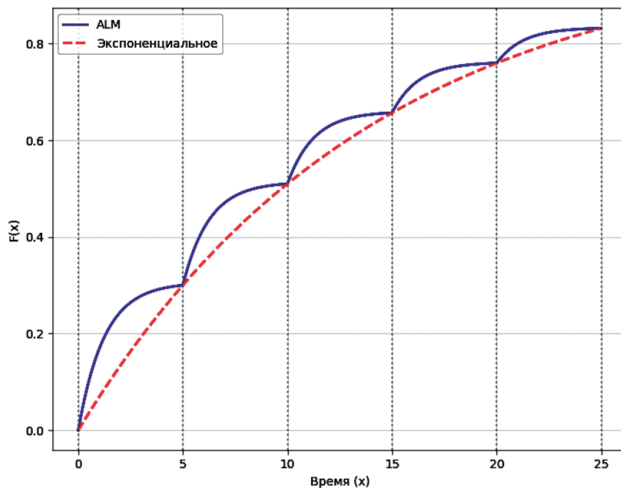


Рис. 2. Функции распределения ALM и экспоненциального распределения

На графике (рис. 2) отчетливо видны «изломы» в точках $x=mc, m=0,1,2,\dots$, где происходит переход между периодами. Эти изломы отражают дискретную природу свойства отсутствия памяти – система «забывает» возраст только в определенные моменты времени. Экспоненциальное распределение, напротив, демонстрирует гладкую монотонно возрастающую функцию распределения. Ступенчатый характер роста функции распределения является визуальным подтверждением того, что свойство отсутствия памяти выполняется только в дискретные моменты времени.

2.3. Интенсивность отказов

Интенсивность отказов для ALM-распределения вычисляется по формуле:

$$\lambda_x(x) = \frac{(1-a)f_Y(x - \lfloor x/c \rfloor c)}{1 - (1-a)F_Y(x - \lfloor x/c \rfloor c)}.$$

График интенсивности отказов (рис. 3) наиболее наглядно демонстрирует ключевое свойство ALM-распределений – периодичность. Функция $\lambda_x(x)$ строго периодична с периодом $c = 5$, повторяя одинаковую форму на каждом интервале $[mc, (m+1)c)$. В отличие от этого, интенсивность отказов экспоненциального распределения постоянна и равна $\lambda = -\frac{\ln a}{c}$.

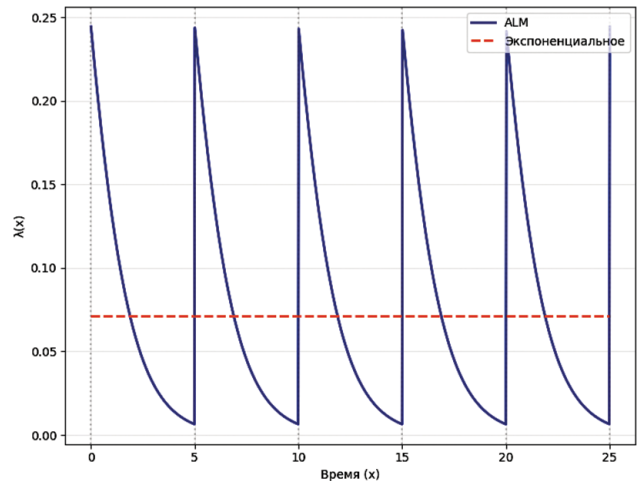


Рис. 3. Интенсивность отказов ALM и экспоненциального распределения

Периодическая интенсивность отказов идеально моделирует системы, работающие в циклически меняющихся условиях, таких как суточные циклы нагрузки, сезонные изменения или регулярные режимы работы оборудования.

2.4. Эмпирическая проверка и моделирование

Для эмпирической проверки свойств ALM-распределения было сгенерировано 1000 реализаций случайной величины с использованием представления:

$$X = Y_c + cZ,$$

где Y_c – случайная величина на $[0, c)$ с усеченным экспоненциальным распределением, а Z – геометрически распределенная случайная величина с параметром $1-a$:

$$P(Z = k) = (1-a)a^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Гистограмма смоделированных данных ALM-распределения (рис. 4) показывает многомодальную структуру с пиками в точках, кратных $c=5$, что полностью соответствует теоретической плотности. Гистограмма экспоненциального распределения демонстрирует характерную убывающую форму.

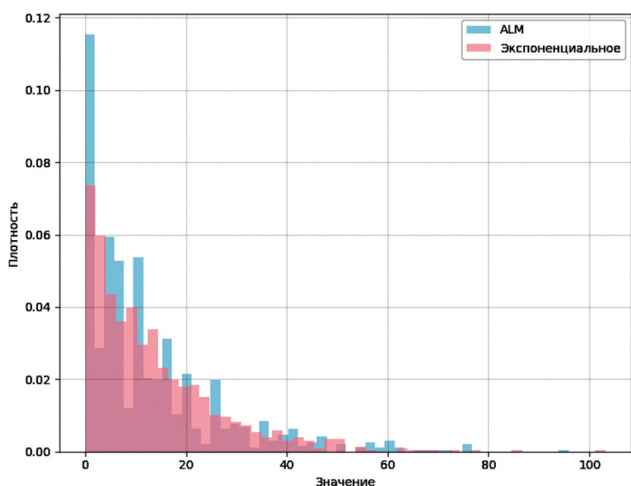


Рис. 4. Гистограммы смоделированных данных

2.5. Анализ свойства отсутствия памяти

Вычислительный анализ подтвердил фундаментальное свойство ALM-распределений:

$$P(X \geq c + x | X \geq c) = P(X \geq x).$$

При этом свойство выполняется только для возрастов, кратных c . Для произвольного возраста y , не кратного c , свойство отсутствия памяти не выполняется.

Численная проверка периодичности интенсивности подтвердила строгую периодичность интенсивности отказов:

$$\lambda_x(x + c) = \lambda_x(x) \quad \text{для всех } x \geq 0.$$

Значения интенсивности в точках x и $x+c$ совпадают с точностью до вычислительной погрешности.

Сравнение статистических характеристик показало:

- ALM-распределение имеет более высокий коэффициент вариации по сравнению с экспоненциальным
- эмпирическое среднее хорошо согласуется с теоретическим значением:

$$E[X] = E[Y_c] + cE[Z] = \mu_y + c \frac{a}{1-a}.$$

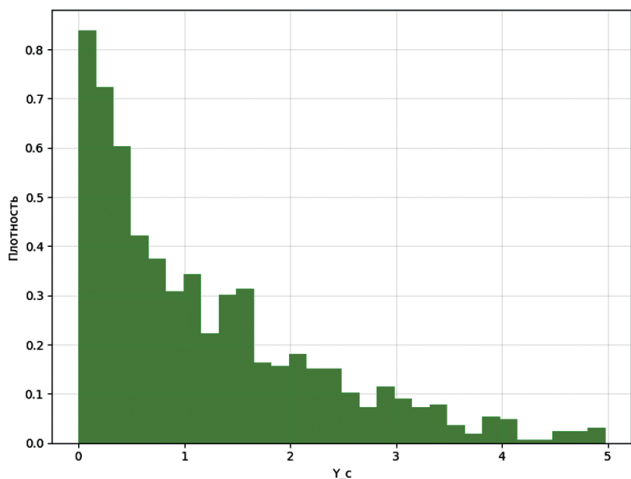


Рис. 5. Распределение компоненты Y_c (на интервале $[0, c)$)

График распределения компоненты Y_c на интервале $[0, c)$ (рис. 5) представляет фундаментальный интерес для понимания структуры ALM-распределений. Эта компонента является первой составляющей в вероятностном представлении ALM-распределения $X=Y_c+cZ$, где Y_c сосредоточена строго на интервале $[0, c)$, а Z представляет собой геометрически распределенную случайную величину, независимую от Y_c .

Визуальное представление демонстрирует усеченное экспоненциальное распределение с параметром $\lambda_y=0,8$ на ограниченном интервале длиной $c=5$. Характер графика показывает монотонное убывание плотности вероятности от максимального значения в начальной точке $y=0$ до минимального вблизи правой границы интервала при $y=c$. Такая форма распределения соответствует математическому выражению плотности $f_{Y_c}(y) = (\lambda_y e^{-\lambda_y y}) / (1 - e^{-\lambda_y c})$ для $y \in [0, c)$, где знаменатель выполняет функцию нормировочной константы, обеспечивающей выполнение условия $\int f_{Y_c}(y) dy = 1$ на ограниченном интервале.

Смысловая интерпретация распределения Y_c раскрывает его как компоненту, описывающую поведение системы внутри одного периода. Компонента Y_c моделирует «остаточное время жизни» объекта в пределах текущего цикла длиной c , демонстрируя, как вероятность отказа распределена внутри этого временного промежутка. Убывающий характер кривой свидетельствует о повышенной уязвимости системы в начальные моменты каждого периода, что может соответствовать реальным физическим процессам, таким как период адаптации к новым условиям или повышенные нагрузки в начале рабочих циклов.

Связь распределения Y_c с полным ALM-распределением проявляется в том, что именно форма этой компоненты определяет характер поведения интенсивности отказов внутри каждого периода. При объединении с геометрической компонентой Z , которая отвечает за счет числа полностью пройденных периодов, распределение Y_c формирует основу для периодической структуры полного распределения X . Можно сказать, что Y_c задает «внутрипериодный профиль» системы, который затем повторяется на каждом интервале $[mc, (m+1)c)$ для $m=0, 1, 2, \dots$

Практическая ценность анализа распределения Y_c заключается в возможности понимания механизмов формирования периодичности в работе систем. Изучение этой компоненты позволяет исследователям оценивать надежность системы в пределах одного цикла эксплуатационной нагрузки и может служить основой для оптимизации стратегий профилактического обслуживания. Знание точного распределения Y_c необходимо для прогнозирования поведения системы в начальные фазы каждого периода, когда часто происходят критические события.

График наглядно подтверждает, что даже внутри отдельных периодов система сохраняет свойства, унаследованные от экспоненциального распределения, но в модифицированной, усеченной форме. Эта ограниченная экспоненциальность в сочетании с дискретной геометрической компонентой порождает принципиально новое

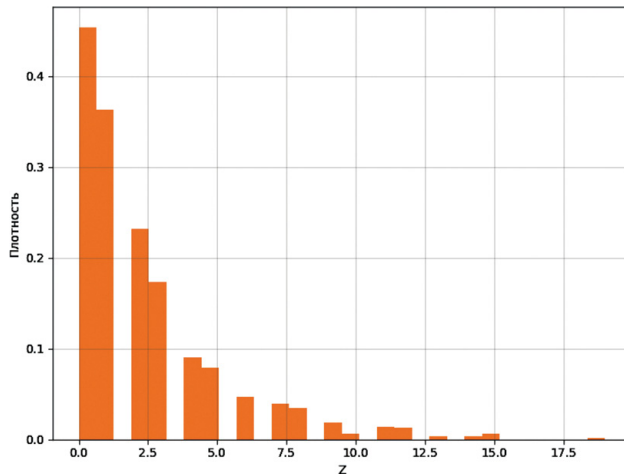


Рис. 6. Распределение компоненты Z (геометрическое)

вероятностное поведение – ALM-распределение, обладающее свойством отсутствия памяти только в дискретные моменты времени. Таким образом, компонента Y_c играет ключевую роль в формировании уникальных характеристик ALM-распределений, обеспечивая математическую основу для моделирования систем, работающих в периодически изменяющихся условиях окружающей среды.

График распределения компоненты Z (рис. 6) представляет особый интерес для понимания дискретной структуры ALM-распределений. Эта геометрически распределенная случайная величина является второй составляющей в фундаментальном представлении ALM-распределения $X=Y_c+cZ$, где Z независима от Y_c и принимает целочисленные значения $k=0,1,2,\dots$. Визуальное представление демонстрирует классическое геометрическое распределение с параметром $p=1-a=0,3$, где $a=P(X \geq c)=0,7$ представляет вероятность «пережить» один полный период длиной c. Характер графика показывает резкое убывание вероятностей $P(Z=k)=(1-a)^k$ с ростом k, что соответствует экспоненциальному декау, типичному для геометрического распределения. Наибольшая вероятность сосредоточена в точке $k=0$, а каждая последующая вероятность уменьшается в a раз по сравнению с предыдущей.

Смысловая интерпретация компоненты Z раскрывает ее как счетчик числа полностью завершенных периодов, которые система способна пройти до наступления отказа. Каждое значение $Z=k$ соответствует тому, что система успешно преодолела k полных циклов длиной c каждый, после чего отказала в течение следующего неполного цикла, описываемого компонентой Y_c . Таким образом, Z моделирует дискретную составляющую «долголетия» системы, измеряемую в целых числах периодов, в то время как Y_c описывает непрерывную составляющую внутри последнего, незавершенного периода. Такая интерпретация напрямую связана с свойством отсутствия памяти в дискретные моменты времени: после завершения каждого полного периода система статистически «обновляется» и начинает следующий период как новая, что математически выражается в том, что условное распределение $X-tc$ при условии $X \geq tc$ не зависит от t.

Связь геометрической компоненты Z с полным ALM-распределением проявляется в создании периодической структуры на макроуровне. В то время как компонента Y_c определяет поведение системы внутри каждого отдельного периода, компонента Z ответственна за повторение этой внутривнутрипериодной структуры на всей временной оси. Именно геометрическое распределение Z обеспечивает свойство «блочного повторения» плотности распределения X, наблюдаемое на основном графике плотности ALM-распределения. Можно сказать, что Z задает «скелет» распределения X, определяя позиции тех точек, где плотность имеет локальные максимумы, соответствующие началам новых периодов.

Практическая значимость анализа распределения Z заключается в возможности оценки «долговечности» системы в терминах числа циклов эксплуатации. Знание параметра $a=P(X \geq c)$ позволяет прогнозировать, сколько полных периодов система likely переживет до отказа, что особенно важно для систем, работающих в циклических режимах, таких как суточные циклы, сезонные изменения или регулярные технологические процессы. Кроме того, геометрический характер распределения Z обеспечивает удобный математический аппарат для вычисления различных вероятностных характеристик системы, таких как среднее время жизни $E[X]=E[Y_c]+cE[Z]$, где $E[Z]=a/(1-a)$.

График наглядно иллюстрирует, как дискретная геометрическая компонента в сочетании с непрерывной компонентой Y_c порождает гибридное распределение, обладающее свойствами как дискретных, так и непрерывных распределений. Эта уникальная комбинация позволяет ALM-распределениям адекватно моделировать системы, в которых процессы старения и обновления происходят на разных временных масштабах: непрерывное старение внутри периодов и дискретное «омоложение» на границах периодов. Таким образом, компонента Z является не просто математической абстракцией, а существенным элементом, отражающим фундаментальные механизмы работы систем в периодически изменяющихся условиях окружающей среды.

Таким образом, представленные графики обеспечивают комплексное визуальное представление ключевых свойств ALM-распределений, а именно:

- периодическая структура плотности и функции распределения;
- строгая периодичность интенсивности отказов;
- дискретное свойство отсутствия памяти;
- согласованность теоретических и эмпирических характеристик.

Выводы

Итак, в статье представлен обзор фундаментальных результатов, посвященных классу распределений с почти отсутствием памяти (ALM), которые служат естественным и мощным обобщением классического экспоненциального распределения. Ключевая мотивация работы связана с необходимостью адекватного моделирования систем, функционирующих в периодически меняющейся среде, где такие факторы, как сезонность, суточные ци-

клы или циклы технического обслуживания, нарушают предположение о стационарности, присущее стандартным экспоненциальным моделям. В статье вводится и всесторонне исследуется класс ALM-распределений, характеризующихся свойством отсутствия памяти не в каждой точке времени, а лишь в дискретные моменты, образующие арифметическую прогрессию. Доказано, что если случайная величина забывает свой возраст в некоторой фиксированной точке, то это свойство автоматически распространяется на все кратные ей моменты времени.

Представлен комплекс эквивалентных характеристик ALM-распределений, включая явный вид функции распределения и плотности, имеющих блочную периодическую структуру, аналитическое свойство периодичности интенсивности отказов, а также вероятностное представление в виде суммы независимой случайной величины на интервале и геометрически распределенной величины. Это представление крайне полезно для моделирования и статистического анализа.

Методология работы носит междисциплинарный характер, объединяя методы теории вероятностей, математической статистики, теории надежности и теории массового обслуживания. Показано, что ALM-распределения напрямую связаны с периодическими нестационарными процессами Пуассона, что открывает широкие возможности для их применения в надежности технических систем, страховании, экологии, исследовании операций и других областях, где процессы подвержены периодическим изменениям.

В заключение отметим, что статья не только систематизирует богатый теоретический материал, но и служит практическим руководством, заполняя важный пробел в вероятностном моделировании. Предложенный класс распределений предоставляет исследователям адекватный и математически стройный аппарат для работы с периодическими нестационарными процессами, наглядно демонстрируя, как глубокие теоретические результаты находят прямое применение в решении прикладных задач.

Список литературы / References

1. Dimitrov B., Petrov P. Controlled process with explicit or implicit breakdowns and repeat action / In: System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge – Basic Approaches, v. 1 (Edit. Sp. Tzafestas et al). D. Reidel Publ. Comp, 1987. Pp. 415-428.
2. Dimitrov B., Kolev N., Petrov P. Control of unreliable process with implicit breakdowns and mixed executive times // Math. Balkanica, New Series. 1988. Vol. 2. Pp. 391-396.
3. Khalil Z., Dimitrov B., Dion J.-P. A characterization of the geometric distribution related to random sums. Rapport de recherche N 76. Univ. de Quebec a Montreal, Dec. 1988. Pp. 1-21.
4. Dimitrov B., Khalil Z. On a new characterization of the exponential distribution related to a queuing system with an unreliable server // J. Appl Probab. 1990. Vol. 27. Pp. 221-226.
5. Khalil Z., Dimitrov B., Dion J.-P. A characterization of the geometric distribution related to random sums // Commun. in Statist. Stochastic Models. 1991. Vol. 7. Pp. 726-729.
6. Dimitrov B., Chukova S. On the bivariate distributions having the almost-lack-of-memory property. Technical Report of the Wurzburg Research Group on Quality Control, No. 33, June 1991. Pp. 1-16.

7. Dimitrov B., von Collani E. A characterization of distributions having the multiplicative almost lack of memory property. Technical report of the Wurzburg Research Group on Quality Control No. 32, June 1991. Pp. 1-16.
8. Khalil Z., Dimitrov B., Petrov P. On the total execution time of a job on unreliable server. Technical report, 1/91, Concordia Univ., Math & Stat. Dept. July 1991.
9. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Characterization of probability distributions similar to the exponential. Tech. Report, Concordia Univ. # 2, 1992. Pp. 1-29.
10. Dimitrov B., Chukova S. On the distributions having the almost lack-of-memory property // J. Appl. Prob. 1992. Vol. 429. No. 3. Pp. 691-698.
11. Dimitrov B., Khalil Z. A class of new probability distributions for modeling environmental evolution with periodic behavior // Environmetrics. 1992. Vol. 3(4). Pp. 447-464.
12. Chukova S., Dimitrov B., Garrido J. Renewal processes generated by distributions with periodic failure rates // Proc. 26-th Annual Actuarial Research Conference, Univ. of Iowa, Aug. 1992 / Editors: James Broffitt and Elias S. Shiu. Actuarial Research Clearing House, 1993. Part 1. Pp. 83-95.
13. Chukova S., Dimitrov B., Garrido J. Renewal and non-homogeneous Poisson processes generated by distributions with periodic failure rate // Statistics & Probability Letters. 1993. Vol. 17. Pp. 19-25.
14. Chukova S., Dimitrov B., Khalil Z. A characterization of probability distributions similar to the exponential // The Canadian Jour. of Statistics. 1993. Vol. 21. No. 3. Pp. 269-276.
15. Dimitrov B., Khalil Z., Le Normand L. A statistical study of periodic environmental processes // Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation, Dec. 6-10, 1993. The Univ. of Western Australia, Perth, 1993. Vol. 41. Pp. 169-174.
16. Chukova S., Dimitrov B., Dion J.-P. Relevation transforms characterize probability distributions // J. of Appl. Math. and Stochastic Analysis. 1993. Vol. 6. No. 4. Pp. 345-358.
17. Dimitrov B., Khalil Z. Some characterizations of the exponential distribution based on the service time properties of an unreliable server // Stability Problems for Stochastic Models (Editors V. V. Kalashnikov, and V. M. Zolotarev). Lecture Notes in Mathematics, 1546. Springer, 1993. Pp. 17-25.
18. Dimitrov B., Chukova S., Green D. Probability distributions in periodic random environment // ASA 1993 Proceedings of the Section on Quality and Productivity. Pp. 251-256.
19. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Bivariate probability distributions similar to exponential // Approximation Probability and Related Fields / Edit. G. Anastassiou and S. Rachev. 1994. Pp. 167-178.
20. Khalil Z., Dimitrov B. The service time properties of an unreliable server characterize the exponential distribution // Adv. Appl. Prob. 1994. Vol. 26. Pp. 172-182.
21. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Definitions, characterizations and structural properties of probability distributions similar to the exponential // J. of Statistical Planning and Inference. 1995. Vol. 43(1). Pp. 271-287.
22. Dimitrov B., von Collani E. Contorted uniform and Pareto distributions // Statistics & Probability Letters. 1995. Vol. 23. No. 1. Pp. 157-164.
23. Chukova S., Dimitrov B. Execution time on an unreliable server with latent breakdowns / In: Matrix-Analytics Methods in Stochastic Models, Edt. S. Chakravarty and A. Alfa. Marcel Dekker, Inc., New York – Basel – Hong Kong, 1996. Pp. 225-239.
24. Dimitrov B. Periodic random environment generates compound counting processes with amazing properties. Applications // 7-th Annual GMI Industry Symposium. Proceedings: Technology & The Quality Revolution. 1996. Pp. 148-163.
25. El-Saidi M.A., Dimitrov B., Chukova S. Some moment properties and limit theorems of the Reversed Generalized Logistic Distribution with applications // Communications in Statistics: Theory and Methods. 1996. Vol. 25. No. 3. Pp. 609-630.

26. Dimitrov B., Khalil Z., El-Saidi M.A. On probability distributions with accumulating failure rates in periodic random environment // *Environmetrics*. 1996. Vol. 7. Pp. 17-26.
27. Garrido J., Dimitrov B., Chukova S. Ruin Modeling for Compound Non-Stationary Process with Periodic Claim Intensity Rate. Technical Report No. 2/96, May, Concordia University, Dept. of Mathematics and Statistics, Montreal, Canada. 1996.
28. Dimitrov B., Chukova S., Green D. Probability distributions in periodic random environment and their applications // *SIAM J. Appl. Math.* 1997. Vol. 57. No. 2. Pp. 501-517.
29. Chukova S., El-Saidi M.A., Dimitrov B. Extended Logistic Distribution. Properties and Possible Applications // *Statistical Data Analysis*, Edt. D. Vandev, Bulg. Acad. Sci., and St. Kl. Ohridski Univ. of Sofia. 1998. Pp. 10-22.
30. Dimitrov B. Uncertainty in periodic random environment // *Applications of Mathematics Engineering*. Vol. 23. Heron Press, Sofia, 1998. Pp. 15-26.
31. Dimitrov B., El-Saidi M.A., Khalil Z. Overall Population Growth in Periodic Environment // *Environmetrics*. 1998. Vol. 9. Pp. 317-328.
32. Dimitrov B., Chukova S. Environmental Modeling in Driving Periodic Conditions // *Applications of Mathematics in Engineering*. Vol. 24. Heron Press, Sofia, 1999. Pp. 21-30.
33. Dimitrov B., Chukova S., Green D. The Bivariate Probability Distributions with Periodic Failure Rate Via a Hyperbolic Differential Equation // *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems*. 1999. Vol. 5. Pp. 81-92.
34. Dimitrov B., Chukova S., El-Saidi M.A. Modeling Uncertainty in Periodic Random Environment: Applications to Environmental Studies // *Environmetrics*. 1999. Vol. 10. Pp. 467-485.
35. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis of an Age Dependent Failure Model for Repairable and Non-Repairable Products. Tech. Rep. No.2/99, July 1999. Dept. of Math. and Statistics, Concordia University, Montreal. Pp. 1-16.
36. Chukova S., Dimitrov B. Rate Models in Environmental Studies. Research Report 2000:1, Division of Quality Technology & Statistics, Lulea Univ. of Technology, SE – 971 87, Lulea, SWEDEN. Pp. 1-6.
37. Dimitrov B., Khalil Z., Christozov D. Reliability Maintenance Under Age – Proportional Repairs / ESREL 2001 Towards a Safer World. Ed. by E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini, Politecnico di Torino // *Proceedings of the European Safety and Reliability Meeting*, v. 2. Pp. 1147-1154.
38. Dimitrov B., Khalil Z., Rykov V. et al. Likelihood Ratio Test for Almost-Lack-of-Memory Distributions. Technical Report #1/2001. Concordia University, Montreal, Canada, 2001. V. 2. Pp. 669-687.
39. Dimitrov B., Chukova S., Chakravarthy S. A simple unreliable service model characterizes exponential distribution // *Kuwait Journal of Sciences*. 2001. Vol. 28. No. 2. Pp. 203-212.
40. Dimitrov B., Chukova S., Vogt H. A Class of Symmetric Probability Distributions Similar to the Double Exponential // *Engineering Simulations*. 2002. Vol. 19. No. 4. Pp. 467-485.
41. Dimitrov B., Khalil Z., Rykov V. et al. Likelihood Ratio Test for Almost-Lack-of-Memory Distributions / In: *Applied Statistical Science IV*, Ed. by M. Ahsanullah, J. P. Dion. Nova Science Publishers, Inc., 2002. Pp. 1-18.
42. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2003. Pp. 241-254.
43. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2003. Pp. 78-94.
44. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2004. Pp. 241-254.
45. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2004. Pp. 78-94.
46. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2005. Pp. 241-254.
47. Dimitrov B., Chukova S., and Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2005. Pp. 78-94.
48. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2006. Pp. 241-254.
49. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2006. Pp. 78-94.
50. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2007. Pp. 241-254.
51. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2007. Pp. 78-94.
52. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2008. Pp. 241-254.
53. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2008. Pp. 78-94.
54. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2009. Pp. 241-254.
55. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2009. Pp. 78-94.
56. Dimitrov B., Chukova S., and Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2010. Pp. 241-254.
57. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2010. Pp. 78-94.
58. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2011. Pp. 241-254.
59. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2011. Pp. 78-94.

60. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7, World Scientific, 2012. Pp. 241-254.

61. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2012. Pp. 78-94.

62. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2013. Pp. 241-254.

63. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2013. Pp. 78-94.

64. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2014. Pp. 241-254.

65. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2014. Pp. 78-94.

66. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2015. Pp. 241-254.

67. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2015. Pp. 78-94.

68. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2016. Pp. 241-254.

69. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2016. Pp. 78-94.

70. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2017. Pp. 241-254.

71. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2017. Pp. 78-94.

72. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2018. Pp. 241-254.

73. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2018. Pp. 78-94.

74. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2019. Pp. 241-254.

75. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2019. Pp. 78-94.

76. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2020. Pp. 241-254.

77. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2020. Pp. 78-94.

78. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2021. Pp. 241-254.

79. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2021. Pp. 78-94.

80. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2022. Pp. 241-254.

81. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2022. Pp. 78-94.

82. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Warranty Cost Analysis with Intermittent Usage / In: *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, Ed. by B. H. Lindquist and K. A. Doksum. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, v. 7. World Scientific, 2023. Pp. 241-254.

83. Dimitrov B., Chukova S., Khalil Z. Probability Distributions in Periodic Random Environment and their Applications / In: *Recent Advances in Statistical Methods*, Ed. by Y. P. Chaubey. Imperial College Press, 2023. Pp. 78-94.

Сведения об авторе

Боян Димитров, д-р физ.-мат. наук, профессор по теории вероятностей и математической статистике, доцент кафедры математики (теория вероятностей и мат. статистика), Инженерно-управленческий институт GMI (ныне Университет Кеттеринга), e-mail: dimitrob@gmail.com, тел.: +1 (810) 344-9628

About the author

Boyan Dimitrov, Dr. of Math. Sci., Professor of Probability and Statistics, Associate Professor of Mathematics (Probability and Statistics), GMI Engineering and Management Inst. (now Kettering), e-mail: dimitrob@gmail.com, tel.: +1 (810) 344-9628

Вклад автора

Постановка задачи и исследования были выполнены автором самостоятельно.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

О некоторых аспектах методики анализа дерева отказов On some aspects of the fault tree analysis methodology

Антонов А.В.¹, Павлов А.С.², Саакян С.П.², Чепурко В.А.^{2*}
Antonov A.V.¹, Pavlov A.S.², Sahakyan S.P.², Chepurko V.A.^{2*}

¹ Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ), Российская Федерация, Обнинск

² АО «РАСУ», Российская Федерация, Москва

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (IATE NRNU MEPhI), Russian Federation, Obninsk

² JSC RASU, Russian Federation, Moscow

* VACHepurko@rasu.ru



Антонов А.В.



Павлов А.С.



Саакян С.П.



Чепурко В.А.

Резюме. Цель. Цель данной работы состоит в дополнении некоторых аспектов методики анализа деревьев отказов (АДО). В предположении, что исходные данные, а именно интенсивности отказов базисных событий, являются случайными величинами, обычно выполняется анализ неопределенности показателя надежности вершины дерева отказов (ДО). Однако если показатель надежности вершины ДО имеет случайный характер, то и принятие решения о выполнимости требований технического задания (ТЗ) не должно проводиться путем простого сравнения рассчитанного показателя с требованием. Одной из целей в данной ситуации является построение критериев принятия решений о выполнимости требований ТЗ методами статистической проверки гипотез. Если неопределенность исходных данных моделируется с помощью логнормального распределения, то зачастую выбор фактора ошибки (ЕF) проводится необоснованно. Второй целью данной работы является обоснование для выбора EF. Конечной целью является введение дополнительных показателей чувствительности в ситуации, когда интересующими показателями надежности вершины ДО является не вероятность отказа или коэффициент неготовности, а параметр потока отказов или средняя наработка между отказами. **Методы.** Применяются классические методы теории вероятностей, математической статистики и математической теории надежности. **Выводы.** В статье показано, что принятие решений о выполнимости (или невыполнимости) требований ТЗ в случае, когда исходные данные (интенсивности отказов) имеют статистическую погрешность, должно осуществляться на методах статистической проверки гипотез, а именно проверки гипотез с помощью доверительных интервалов. Кроме этого, в случае логнормального распределения интенсивности отказов приведено обоснование выбора фактора ошибки – EF. Если требования ТЗ касаются параметра потока отказов или средней наработки между отказами и при этом исследуется чувствительность показателя надежности вершины ДО относительно базисных событий, то при этом необходимо использовать специальные показатели чувствительности.

Abstract. Aim. The paper aims to supplement certain aspects of the Fault Tree Analysis (FTA) methodology. Assuming that the input data, namely the failure rates of basic events, are random variables, an uncertainty analysis of the dependability indicator at the top event of the fault tree (FT) is usually performed. However, if the dependability indicator of the FT top event is random, then the decision on whether the requirements of the technical specifications (TS) are met should not be made by simply comparing the calculated indicator with the requirement. One of the goals in this situation is to construct decision-making criteria for the fulfillment of TS requirements using statistical hypothesis testing methods. If the uncertainty of the input data is modeled using a lognormal distribution, the choice of the error factor (EF) is often unjustified. The second objective of this paper is to provide a justification for the choice of EF. The ultimate goal is to introduce additional sensitivity measures in situations where the reliability indicators of interest for the FT top event are not the failure probability or unavailability, but the failure flow or mean time between failures. **Methods.** Classical methods of probability theory, mathematical statistics, and mathematical reliability theory are used. **Conclusions.** The paper shows that decision-making on the fulfillment (or non-fulfillment) of TS requirements, in cases where the input data (failure rates) have statistical uncertainty, should be based on statistical hypothesis testing methods, namely hypothesis testing using confidence intervals. Furthermore, in case of a lognormal distribution of failure rates, a justification for the choice of the error factor (EF) is provided. If the TS requirements concern the failure flow or the mean time between failures, and the sensitivity of the FT top event dependability indicator with respect to basic events is being investigated, then special sensitivity measures must be used.

Ключевые слова: анализ дерева отказов, вершина дерева отказов, интенсивность отказов, параметр потока отказов, средняя наработка между отказами, доверительный интервал, фактор ошибки, фактор чувствительности, Δ -чувствительность, Q -чувствительность, T -чувствительность.

Keywords: fault tree analysis, fault tree top event, failure rate, failure flow, mean time between failures, confidence interval, error factor, sensitivity factor, Δ -sensitivity, Q -sensitivity, T -sensitivity.

Для цитирования: Антонов А.В., Павлов А.С., Саакян С.П., Чепурко В.А. О некоторых аспектах методики анализа дерева отказов // Надежность. 2026. №2. С. 45-50. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-45-50>

For citation: Antonov A.V., Pavlov A.S., Sahakyan S.P., Chepurko V.A. On some aspects of the fault tree analysis methodology. Dependability 2026;2: 45-50. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-45-50>

Поступила: 25.12.2025 / **После доработки:** 15.01.2026 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 25.12.2025 / **Revised on:** 15.01.2026 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Как известно, одним из основных результатов анализа деревьев отказов (АДО) является получение показателя надежности вершины дерева отказов (ДО) и затем его сравнение с требуемым показателем надежности с целью доказательства того, что требования выполняются, либо это не так. В том случае, если расчеты выполняются при неслучайных исходных данных, обычно это интенсивности отказов или вероятности базисных событий, то сравнение кажется вполне приемлемой процедурой. Если же исходные данные случайны, т.е. основаны на имеющейся статистике об отказах, то сравнение должно осуществляться несколько сложнее, путем применения методов статистической проверки гипотез.

Одно из частых предположений, которые делаются при моделировании случайных исходных данных, это предположение, что исходные интенсивности (реже вероятности) распределены согласно логнормальному закону. При этом среднее значение обычно известно, а погрешность, или иная величина, неизвестна. В то время, как логнормальный закон содержит два параметра, получается так, что второй параметр определяется из некоторого, зачастую необоснованного допущения. Обычно оно касается фактора ошибки EF . В некоторых исследованиях без всякой аргументации предполагается значение 3 или даже 10.

При анализе чувствительности иногда используется показатели значимости, обычно по Бирнбауму, иногда иные показатели, которые вычисляют изменение вероятности отказа (коэффициента неготовности) вершины ДО при некотором изменении вероятности отказа интересующего базисного события. Но если в вершине ДО рассчитывается интенсивность отказов или средняя наработка между отказами, то и показатель чувствительности должен измерять изменение соответствующего показателя (интенсивности или средней наработки) при вариации такого же показателя базисного события.

Статья посвящена рассмотрению этих трех вопросов, возникающих при анализе ДО.

1. Проверка выполнимости требований ТЗ

Анализ неопределенности позволяет рассчитать неопределенность в вероятности верхнего события ДО, возникающую из неопределенностей в исходных данных базисных событий. Для анализа неопределенности применяется как вычислительные, так и аналитические процедуры. Наряду со статистическим определением необходимых квантилей закона распределения рассчитываемого показателя надежности, анализ неопределенности позволяет вычислить оценку среднего значения и среднеквадратического отклонения этого показателя. Поскольку объем испытаний в наших руках, то предполагаемый результат оценивания будет достаточно высокого качества.

В [1] указано, что «результаты анализа надежности систем (элементов), для которых установлены нормируемые показатели надежности, сравниваются с указанными показателями». Но т.к. рассчитываемые показатели надежности имеют случайный характер и, соответственно, погрешность вычислений, то требования ТЗ к показателю не должны быть произведены путем простого сравнения нормируемого и рассчитанного показателя. Например, пусть требование ТЗ на нормируемый показатель – средняя наработка должна быть не ниже 10 000 ч. Рассчитанный показатель – средняя наработка 9990 ч. В данной ситуации нельзя утверждать то, что требования ТЗ не выполняются. Поскольку наработка – случайная величина, то для сравнения, проверки выполнимости требований ТЗ должны применяться методы статистической проверки гипотез. Именно эти методы позволяют принимать различные решения по статистической выборке.

Для проверки выполнимости требований ТЗ к показателям надежности строятся односторонние доверительные интервалы определенной надежности. Проверка выполнимости требований ТЗ осуществляется путем выяснения – попадает ли требуемое значение показателя надежности в соответствующий доверительный интервал (дополнение к критической

области), или накрывает ли доверительный интервал требуемое значение, что одно и то же.

Если требование предъявляется к показателю надежности – средняя наработка T , для которого указано, что средняя наработка должна быть не ниже $T_{ТЗ}$, то альтернативной гипотезой к этому требованию будет утверждение

$$H_1: T < T_{ТЗ}$$

В этом случае односторонней доверительной областью будет интервал вида $[0; T_{верх}]$. Если выполняется условие:

$$T_{ТЗ} \in [0; T_{верх}],$$

то с выбранным уровнем доверия можно считать, что требуемое ТЗ значение достигается и требование выполняется. В противном случае требование ТЗ не выполняется.

Если требование предъявляется к показателю надежности – вероятность отказа на требование P_o , для которого указано, что показатель должен быть не выше $P_{o,тз}$, то альтернативной гипотезой к этому требованию будет утверждение

$$H_1: P_o > P_{o,тз}$$

В этом случае односторонней доверительной областью будет интервал вида $[P_{o,ниж}; 1]$. Если выполняется условие:

$$P_{o,тз} \in [P_{o,ниж}; 1],$$

то с выбранным уровнем доверия можно считать, что требуемое ТЗ значение достигается и требование выполняется. В противном случае требование ТЗ не выполняется.

Если требование предъявляется к показателю надежности – коэффициент неготовности $K_{не}$, для которого указано, что показатель должен быть не выше $K_{не,тз}$, то альтернативной гипотезой к этому требованию будет утверждение

$$H_1: K_{не} > K_{не,тз}$$

В этом случае односторонней доверительной областью будет интервал вида $[K_{не,ниж}; 1]$. Если выполняется условие:

$$K_{не,тз} \in [K_{не,ниж}; 1],$$

то с выбранным уровнем доверия можно считать, что требуемое ТЗ значение достигается и требование выполняется. В противном случае требование ТЗ не выполняется.

Если требование предъявляется к показателю надежности – частота ложных срабатываний W , для которого указано, что частота ложных срабатываний должна быть не выше $W_{ТЗ}$, то альтернативной гипотезой к этому требованию будет утверждение

$$H_1: W > W_{ТЗ}$$

В этом случае односторонней доверительной областью будет интервал вида $[W_{ниж}; \infty)$. Если выполняется условие:

$$W_{ТЗ} \in [W_{ниж}; \infty)$$

то с выбранным уровнем доверия можно считать, что требуемое ТЗ значение достигается и требование выполняется. В противном случае требование ТЗ не выполняется.

Для построения границ доверительной области (табл. 1) применяется ЦПТ (центральная предельная теорема).

Табл. 1. Границы доверительных интервалов

| Обозначение | Граница д.и. | P-значение |
|--------------|---|---|
| $T_{верх}$ | $\bar{T} + S_T u_{1-\alpha} / \sqrt{n}$ | $\Phi\left(\sqrt{n} \frac{\bar{T} - T_{ТЗ}}{S_T}\right)$ |
| $P_{o,ниж}$ | $\bar{P}_o - S_{P_o} u_{1-\alpha} / \sqrt{n}$ | $\Phi\left(\sqrt{n} \frac{P_{o,ТЗ} - \bar{P}_o}{S_{P_o}}\right)$ |
| $K_{не,ниж}$ | $\bar{K}_{не} - S_{K_{не}} u_{1-\alpha} / \sqrt{n}$ | $\Phi\left(\sqrt{n} \frac{K_{не,ТЗ} - \bar{K}_{не}}{S_{K_{не}}}\right)$ |
| $W_{ниж}$ | $\bar{W} - S_W u_{1-\alpha} / \sqrt{n}$ | $\Phi\left(\sqrt{n} \frac{W_{ТЗ} - \bar{W}}{S_W}\right)$ |

Примечание: В таблице $\bar{T}, \bar{P}_o, \bar{K}_{не}, \bar{W}$ – это средние значения показателей надежности, S – оценка среднеквадратического отклонения, $u_{1-\alpha}$ – квантиль уровня $1-\alpha$ стандартного нормального $N(0;1)$ закона, Φ – функция распределения этого же закона.

Пример. Пусть искомым показателем надежности – средняя наработка до отказа. По ТЗ требуемое значение – не ниже 10 000 ч. Рассчитанный показатель надежности $\bar{T} = 9990$ ч. Объем испытаний методом Монте-Карло $n=10000$, среднеквадратичное отклонение $S_T=4900$ ч. В табл. 2 приведены значения верхней границы для средней наработки для трех общепринятых уровней значимости α .

Табл. 2. Значения доверительной верхней границы

| Уровень значимости | 0,01 | 0,05 | 0,1 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| $T_{верх}$ | 10 103,99 | 10 070,60 | 10 052,80 |

Так как требование по ТЗ накрывается доверительным интервалом, то со всеми общепринятыми уровнями значимости можно считать, что посчитанное значение средней наработки не противоречит требованиям ТЗ. Соответствующее P-значение равно 0,419, т.к. оно больше, чем любой общепринятый уровень значимости, то получаем аналогичный вывод.

2. О возможном выборе фактора ошибки

Пусть у нас имеется логнормальное распределение $LN(\mu, \sigma^2)$ для параметра λ . Фактор ошибки можно определить так:

$$EF = \exp(\sigma u_\epsilon), \tag{1}$$

где $u_\epsilon=1,645$ – квантиль стандартного нормального закона уровня $\epsilon=0,95$. Попытаемся найти обоснованное значение параметра σ .

Известно, что $\ln \lambda$ подчиняется нормальному закону, т.е. $v = \ln \lambda \sim N(\mu, \sigma^2)$, при этом математическое ожидание и дисперсия v определяются параметрами нормального закона

$$E v = \mu, \text{var } v = \sigma^2.$$

Ограничим относительную погрешность:

$$P(|v - \mu| < k\sigma) = P(|\Delta v| < k\sigma) =$$

$$= P\left(\frac{|\Delta v|}{|E v|} < \frac{k\sigma}{|\mu|}\right) = \begin{cases} 0,6827; k = 1, \\ 0,9011; k = 1,65, \\ 0,9500; k = 1,96, \\ 0,9545; k = 2, \\ 0,9749; k = 2,24, \\ 0,9901; k = 2,58, \\ 0,9973; k = 3. \end{cases}$$

Здесь $\frac{|\Delta v|}{|E v|}$ – это относительная погрешность. Ее

можно ограничить числом $\delta = \frac{k\sigma}{|\mu|} = \begin{cases} 0,01 \\ 0,05 \\ 0,1 \end{cases}$.

Отсюда $\sigma = \frac{\delta}{k} \mu$. Это одно уравнение. Второе –

$E \lambda = \lambda_{mean} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$. Имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} \mu + \frac{\sigma^2}{2} = \ln \lambda_{mean}; \\ \sigma = \frac{\delta}{k} |\mu|. \end{cases}$$

Для σ получаем квадратное уравнение

$$\sigma^2 \pm \frac{2k}{\delta} \sigma - 2 \ln \lambda_{mean} = 0.$$

Решением будет следующее положительное значение параметра

$$\sigma = r - \sqrt{r^2 + 2 \ln \lambda_{mean}},$$

где $r = \frac{k}{\delta}$.

На рис. 1 представлена диаграмма зависимости фактора ошибки (1) от $\ln \lambda_{mean}$ при различных значениях r . Увеличение r может быть обусловлено либо увеличением k , либо уменьшением δ . И то, и другое сопровождается улучшением качества оценки относительной погрешности. Видно, что улучшение качества оценки приводит к уменьшению фактора ошибки. С другой стороны, увеличение $\ln \lambda_{mean}$ ведет к почти линейному убыванию фактора.

На практике рекомендуется для r значение 40 (при $\delta=0,05$ и $k=2$). Далее необходимо определить наименьшую и наибольшую интенсивности отказов в исходных данных. К примеру, допустим наименьшая интенсивность отказов $1 \cdot 10^{-7}$ 1/час, а наибольшая $1 \cdot 10^{-5}$ 1/час. В этом случае фактор ошибки меняется от 1,95 при $\ln \lambda_{mean} = -16,12$ (низкая интенсивность отказов) до 1,61 при $\ln \lambda_{mean} = -11,51$ (высокая интенсивность отказов).

Если перед нами стоит задача оценки неопределенности, то консервативно имеет смысл брать большее значение 1,95, т.к. в этом случае будет получаться большее по длине расстояние между квантилями. Если же перед нами стоит задача проверки гипотез и принятия решения о непротиворечивости ТЗ, то из того же принципа соблюдения консерватизма, имеет смысл брать меньшее значение 1,61, т.к. в этом случае доверительный интервал будет минимальным и, возможно, мы отклоним пусть и верную нулевую гипотезу, но обезопасим себя от ошибки другого рода – отклоним верную альтернативу, утверждающую, что требования ТЗ не выполняются.

Зависимости EF

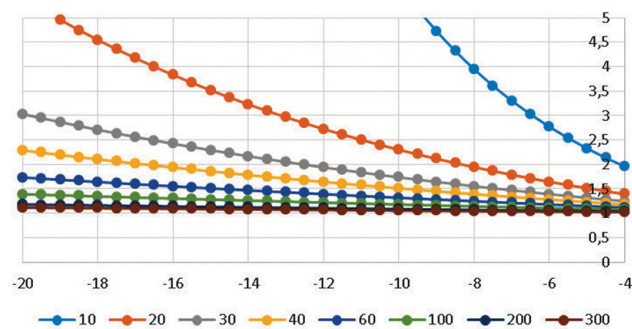


Рис. 1. Зависимость фактора ошибки от $\ln \lambda_{mean}$

3. Чувствительность

Показатель S (sensitivity) – показатель чувствительности. При расчете этого показателя используется параметр расчета «Фактор чувствительности» SF . Чувствительность – это отношение вероятности (частоты) отказа системы при условии, что вероятность отказа элемента выросла в SF раз, к вероятности отказа системы при условии, что вероятность отказа элемента уменьшилась в SF раз:

$$S_i^{(Q)}(SF) = \frac{Q_{\text{системы}}(Q_i \cdot SF)}{Q_{\text{системы}}(Q_i / SF)}.$$

Согласно [2] стр. 238

$$Q_{\text{системы}}(Q_i) = Q_i \cdot Q_{\text{системы}}(1_i) + (1 - Q_i) \cdot Q_{\text{системы}}(0_i) =$$

$$= Q_i \cdot I_B(i) + Q_{\text{системы}}(0_i) = Q_{\text{системы}}(1_i) - (1 - Q_i) \cdot I_B(i).$$

Поэтому

$$S_i^{(Q)}(SF) = \frac{Q_{\text{системы}}(0_i) + I_B(i) \cdot Q_i \cdot SF}{Q_{\text{системы}}(0_i) + I_B(i) \cdot Q_i / SF}$$

По аналогии с Q -чувствительностью можно ввести понятие Λ -чувствительности, если ключевым показателем надежности является интенсивность отказов:

$$S_i^{(\Lambda)}(SF) = \frac{\Lambda_{\text{системы}}(\lambda_i \cdot SF)}{\Lambda_{\text{системы}}(\lambda_i / SF)}$$

$$\Lambda_{\text{системы}}(\lambda_i) = \lambda_i (1 - Q_i) \cdot I_B(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_j (1 - Q_j) \cdot I_B(j),$$

$$S_i^{(\Lambda)}(SF) = \frac{\Lambda_{\text{системы}} + \lambda_i (SF - 1)(1 - Q_i) \cdot I_B(i)}{\Lambda_{\text{системы}} - \lambda_i (1 - 1/SF)(1 - Q_i) \cdot I_B(i)} \approx \frac{\Lambda_{\text{системы}} + \lambda_i (SF - 1) \cdot I_B(i)}{\Lambda_{\text{системы}} - \lambda_i (1 - 1/SF) \cdot I_B(i)} \quad (2)$$

И, в конце концов, T -чувствительность:

$$S_i^{(T)}(SF) = \frac{T_{\text{системы}}(T_i \cdot SF)}{T_{\text{системы}}(T_i / SF)} = \frac{T_{\text{системы}}(\lambda_i / SF)}{T_{\text{системы}}(\lambda_i \cdot SF)}$$

Учитывая зависимость средней наработки от коэффициента неготовности и интенсивности потока отказов [3], стр. 203

$$S_i^{(T)} = \frac{1 - Q_{\text{системы}}(\lambda_i / SF)}{1 - Q_{\text{системы}}(\lambda_i \cdot SF)} \cdot S_i^{(\Lambda)}(SF).$$

Дробью перед $S_i^{(\Lambda)}(SF)$ можно пренебречь:

$$S_i^{(T)} \approx S_i^{(\Lambda)}.$$

Таким образом, можно говорить об обобщенной Λ, T -чувствительности, определяемой выражением (2).

Пример. Рассчитаем показатели чувствительности для следующей системы (рис. 2).

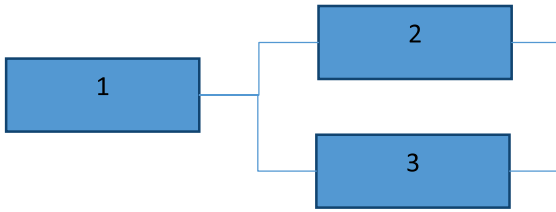


Рис. 2. Последовательно-параллельная система

При этом отказы этих элементов могут иметь как явный, так и скрытый характер. Модель явных отказов подразумевает немедленное их обнаружение и устранение за среднее время восстановления $\tau=8$ час. Модель скрытых отказов подразумевает периодическое обнаружение возможных отказов во время проведения плановых профилактик с периодом $\theta=2160$ часов – 3 месяца. Кроме этого, возможны отказы по общим причинам (ООП) 2-го и 3-го элемента причем как явные, так и скрытые. Для учета ООП используется модель β -фактора с коэффициентом $\beta=0,05$. Интенсивности отказов 1-го, 2-го и 3-го элементов соответственно $\lambda_1=1 \cdot 10^{-6}$ 1/час, $\lambda_2=\lambda_3=1 \cdot 10^{-5}$ 1/час. Охват диагностикой, т.е. доля явных отказов составляет $\delta=0,99$. Расчеты выполняются на мо-

мент времени $T=1$ год. Для модели явных отказов расчет коэффициента неготовности производится по формуле

$$Q(T) = \frac{\lambda \kappa}{\lambda \kappa + \rho} \left[1 - e^{-(\lambda \kappa + \rho)T} \right].$$

Для модели скрытых отказов расчет коэффициента неготовности производится по формуле

$$Q(T) = 1 - e^{-\lambda \kappa (T \bmod \theta)},$$

где $\rho=1/\tau$, λ – интенсивность отказов,

$$\kappa = \begin{cases} \delta(1-\beta) - \text{независимые явные отказы}; \\ (1-\delta)(1-\beta) - \text{независимые скрытые отказы}; \\ \delta\beta - \text{явные ООП}; \\ (1-\delta)\beta - \text{скрытые ООП}; \\ \delta - \text{явные отказы}; \\ 1-\delta - \text{скрытые отказы}. \end{cases}$$

Коэффициент неготовности будет приближенно определяться выражением

$$Q_{\text{системы}} \approx Q_{1,я} + Q_{1,с} + (Q_{2,н,я} + Q_{2,н,с})(Q_{3,н,я} + Q_{3,н,с}) + Q_{2-3,ООП,я} + Q_{2-3,ООП,с},$$

где индексы у событий означают следующее: $Q_{1,я}$ – коэффициент неготовности 1-го элемента, отказавшего явно, $Q_{1,с}$ – коэффициент неготовности 1-го элемента, отказавшего скрыто, $Q_{i,н,я}$ – коэффициент неготовности i -го

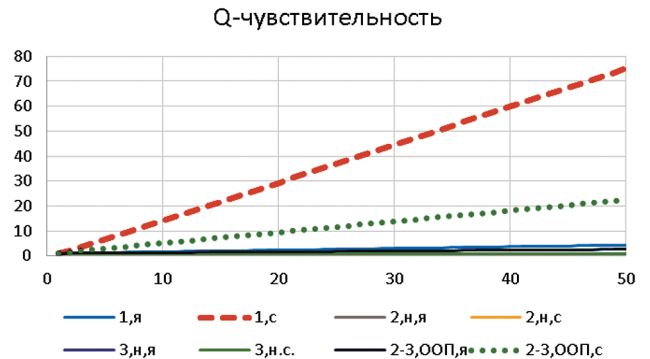


Рис. 3. Зависимость Q -чувствительности от фактора чувствительности SF

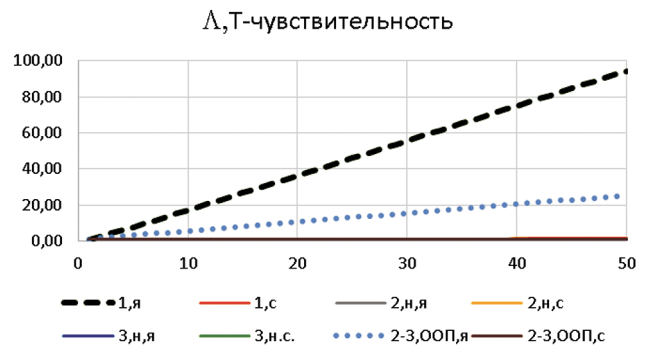


Рис. 4. Зависимость Λ, T -чувствительности от фактора чувствительности SF

элемента, явно отказавшего по независимой причине, $Q_{i,n,c}$ – коэффициент неготовности i -го элемента, скрыто отказавшего по независимой причине, $Q_{2-3,ООП,я}$ – коэффициент неготовности 2-го и 3-го элементов, отказавших явно по общей причине, $Q_{2-3,ООП,я}$ – коэффициент неготовности 2-го и 3-го элементов, отказавших скрыто по общей причине.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости Q -чувствительности и Λ, T -чувствительности соответственно для каждого из восьми событий.

Можно отметить, по рис. 3, что наиболее чувствителен коэффициент неготовности вершины ДО к коэффициенту неготовности события отказ 1-го элемента скрытый, затем к коэффициенту неготовности скрытого ООП 2-го и 3-го элемента. Связано это с тем, что модель скрытого отказа дает существенно худшую неготовность, в отличие от модели явного отказа. В то же самое время, судя по рис. 4, наиболее чувствительна интенсивность потока отказов (средняя наработка между отказами) вершины ДО к интенсивности отказов события отказ 1-го элемента явный, затем к интенсивности отказов явного ООП 2-го и 3-го элементов. Связано это с диагностическим охватом т.е. с тем, что на модель явного отказа приходится 99% доли интенсивности, в отличие от модели скрытого отказа, на которую приходится доля в 1%.

Список литературы

1. РБ-100-15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций».

2. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Перевод с нем. М.Г. Коновалова; Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1988. 391 с.: ил.

3. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие. СПб.: Питер, 2005. 479 с.: ил.

References

1. RB-100-15. Safety Guidelines for the use of nuclear energy “Recommendations on conducting dependability analysis of safety-critical systems and components of nuclear power plants and their functions.”

2. Beichelt F. Reliability and maintenance. Mathematical methods. Moscow: Radio i sviaz; 1988.

3. Cherkesov G.N. [Dependability of hardware and software systems. A study guide]. Saint Petersburg: Piter; 2005. (in Russ.)

Сведения об авторах

Антонов Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор Обнинского института

атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ), Российская Федерация, Обнинск, e-mail: antonov@iate.obninsk.ru, тел.: +7(910)912-40-10, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Маркса, д. 75, кв. 184.

Павлов Алексей Сергеевич – главный эксперт отдела по обоснованию безопасности и моделированию АО РАСУ, Российская Федерация, Москва, e-mail: AleSePavlov@rasu.ru, тел.: +7(910)545-68-79, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Табулевича, д. 7, кв. 230.

Саакян Сурен Петросович – кандидат технических наук, начальник отдела по обоснованию безопасности и моделированию АО РАСУ, Российская Федерация, Москва, e-mail: SuPSaakyan@rasu.ru, тел.: +7(985)145-45-84, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Курчатова, д. 9, кв. 7.

Чепурко Валерий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, главный эксперт отдела по обоснованию безопасности и моделированию АО РАСУ, Российская Федерация, Москва, e-mail: VAChepurko@rasu.ru, тел.: +7(903)815-97-37, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Маркса, д. 73, кв. 271.

About the authors

Aleksandr V. Antonov, Doctor of Engineering, Professor, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (IATE NRNU MEPhI), Russian Federation, Obninsk, e-mail: antonov@iate.obninsk.ru, tel.: +7(910)912-40-10, Kaluga Oblast, Obninsk, Marksa Ave., 75, apt. 184.

Aleksey S. Pavlov, Chief Expert, Safety Justification and Modeling Department, JSC RASU, Russian Federation, Moscow, e-mail: AleSePavlov@rasu.ru, tel.: +7(910)545-68-79, Kaluga Oblast, Obninsk, Tabulovicha St., 7, apt. 230.

Suren P. Sahakyan, Candidate of Engineering, Head of Safety Justification and Modeling Department, JSC RASU, Russian Federation, Moscow, e-mail: SuPSaakyan@rasu.ru, tel.: +7(985)145-45-84, Kaluga Oblast, Obninsk, Kurchatova St., 9, apt. 7.

Valeriy A. Chepurko, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Chief Expert, Safety Justification and Modeling Department, JSC RASU, Russian Federation, Moscow, e-mail: VAChepurko@rasu.ru, tel.: +7(903)815-97-37, Kaluga Oblast, Obninsk, Marksa Ave., 73, apt. 271.

Вклад авторов в статью

Антонов А.В. разобрал примеры, нашел частные решения

Павлов А.С. провел обзор литературы, проанализировал Q, Λ, T -чувствительность.

Саакян С.П. провел обзор литературы, предложил возможный способ выбора фактора ошибки.

Чепурко В.А. предложил методику проверки выполнения требований ТЗ при наличии погрешности в исходных данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Модель угроз БПЛА как составляющая модели угроз интеллектуальных транспортных систем

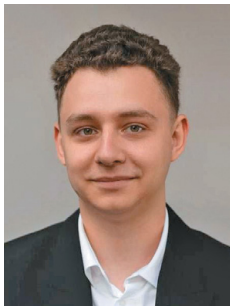
UAV threat model as a component of the intelligent transportation systems threat model

Домашкин А.Д.¹, Логинова Л.Н.^{1*}, Ковров А.И.¹
Domashkin A.D.¹, Loginova L.N.^{1*}, Kovrov A.I.¹

¹ Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

¹ Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

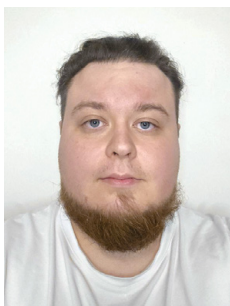
* ludmilanv@mail.ru



Домашкин А.Д.



Логинова Л.Н.



Ковров А.И.

Резюме. Цель. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все шире интегрируются в интеллектуальные транспортные системы (ИТС), становясь одним из критических элементов транспортной инфраструктуры. Вместе с тем зависимость функционирования БПЛА от программного обеспечения (ПО), беспроводных каналов связи и внешних систем навигации делает их уязвимыми к информационным угрозам. Целью работы является проведение комплексного анализа угроз информационной безопасности (ИБ) БПЛА в контексте их функционирования в составе ИТС и разработка модели угроз, охватывающей аппаратные, программные, коммуникационные и инфраструктурные компоненты. **Методы.** В работе применены методы системного анализа, моделирования угроз ИБ, а также анализ архитектуры программно-аппаратных комплексов (ПАК) БПЛА с выделением ключевых объектов воздействия. Используются подходы, основанные на классификации угроз по стандартам ФСТЭК РФ, а также методы анализа взаимосвязей между угрозами, уязвимостями и средствами защиты. **Результаты.** Разработана модель угроз БПЛА как элемента ИТС, охватывающая аппаратные компоненты, ПО, коммуникационные каналы, информационные потоки и наземную инфраструктуру. Выявлены наиболее критичные угрозы БПЛА, включая нарушение функционирования, компрометацию данных и физическое воздействие. Проведен анализ существующих решений по защите информации и показано, что отсутствует системный подход к обеспечению безопасности. На основе проведенного анализа обоснована необходимость внедрения методологии конструктивной информационной безопасности (КИБ) в соответствии с ГОСТ Р 72118-2025. **Заключение.** Предложенный подход, основанный на методологии КИБ, позволяет проектировать БПЛА с изначально заложенной устойчивостью к широкому спектру угроз ИБ, включая киберфизические атаки и нарушения целостности данных, что особенно актуально для интеграции БПЛА в ИТС, где отказ или компрометация одного элемента может повлечь системные сбои. Экспериментальная апробация подхода в рамках образовательных проектов подтверждает применимость и эффективность методологии КИБ.

Abstract. Aim. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly integrated into intelligent transportation systems (ITS), becoming one of the critical elements of the transportation infrastructure. At the same time, the dependence of UAVs on software, wireless communication channels, and external navigation systems makes them vulnerable to cybersecurity threats. The purpose of the paper is to conduct a comprehensive analysis of cybersecurity threats to UAVs in the context of their operation as part of ITS and to develop a threat model covering hardware, software, communication, and infrastructure components. **Methods.** The paper uses methods of system analysis, cybersecurity threat modelling, as well as architecture analysis of UAV software and hardware systems involving the identification of key targets. The paper uses methods based on the classification of threats according to the standards of the FSTEC of the Russian Federation, as well as methods for analysing the relationships between threats, vulnerabilities, and means of protection. **Results.** A threat model of UAVs as an element of ITS has been developed, covering hardware components, software, communication channels, information flows, and ground infrastructure. The most critical threats have been identified, including disruption, data compromise, and physical impact. An analysis of existing information security solutions has been carried out and it has been shown that there is no systematic approach to ensuring security. Based on the analysis, the authors substantiate the application of the security by design (SBD) methodology according to GOST R 72118-2025. **Conclusion.** The proposed SBD-based approach allows designing UAVs with inherent resistance to a wide range of cybersecurity threats, including cyber-physical attacks and data integrity violations, which is especially important given the

requirements of UAV integration into ITS, where the failure or compromise of an element can lead to system failures. Experimental testing of the approach as part of educational projects confirms the applicability and effectiveness of the SBD methodology.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, информационная безопасность, интеллектуальные транспортные системы, модель угроз, конструктивная информационная безопасность, ГОСТ Р 72118-2025, программно-аппаратный комплекс, защита данных.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, information security, intelligent transportation systems, threat model, security by design, GOST R 72118-2025, hardware and software system, data protection.*

Для цитирования: Домашкин А.Д., Логинова Л.Н., Ковров А.И. Модель угроз БПЛА как составляющая модели угроз интеллектуальных транспортных систем // Надежность. 2026. №2. С. 51-58. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-51-58>

For citation: Domashkin A.D., Loginova L.N., Kovrov A.I. UAV threat model as a component of the intelligent transportation systems threat model. *Dependability 2026*;2: 51-58. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-51-58>

Поступила: 20.11.2025 / **После доработки:** 28.12.2025 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 20.11.2025 / **Revised on:** 28.12.2025 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Обеспечение безопасности интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в условиях стремительной цифровизации является актуально задачей. Интеграция, высокие темпы внедрения и уязвимости информационных и телекоммуникационных технологий, технологий искусственного интеллекта и связи влекут появление новых типов угроз безопасности ИТС [1–3]. В современном мире беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стремительно распространяются в рамках ИТС [4, 5], значительно опережая развитие мер безопасности. БПЛА становятся критически важной частью транспортной системы, от стабильности которой зависит функционирование целых отраслей – от автоматизированных грузоперевозок до наблюдения за состоянием инфраструктуры. Из-за зависимости БПЛА от беспроводной связи, GPS, ГЛОНАСС и сложного программного обеспечения (ПО) они становятся привлекательной целью для злоумышленников.

Большинство современных исследований сосредоточены на отдельных технических уязвимостях, таких как GPS спуфинг, или на узконаправленных военных применениях, однако в данных исследованиях отсутствует комплексный подход, который рассматривает БПЛА не как отдельное устройство, а как часть интеллектуальной системы, включающей само устройство, наземные станции, операторов, цепочки поставок и т.д. Пробел в академическом подходе находит прямое отражение и в практической сфере. В частности, юридические исследования подтверждают наличие системных пробелов, указывая на отсутствие в российском законодательстве адекватных мер противодействия угрозам со стороны БПЛА [6].

В современной российской практике эксплуатации БПЛА отсутствуют унифицированные программные платформы, охватывающие обучение операторов, пла-

нирование и мониторинг полетов, анализ геопро пространственных данных, цифровую экспертизу, рейтинговую оценку участников и страхование, что обусловлено разнообразием отраслевых стандартов и технических ограничений, связанных с интеграцией разнородных систем. Данная ситуация обусловлена высокой специализацией задач, разнообразием отраслевых стандартов и технических ограничений, связанных с интеграцией разнородных систем. Вместе с тем, фрагментированный подход создает значительные риски информационной безопасности (ИБ), т.к. высокая специализация задач и сложность взаимодействия между различными системами затрудняют обеспечение единого уровня защиты данных и контроля доступа.

1. Состояние вопроса ИБ БПЛА

В статье [7] представлен иерархический подход к анализу рисков, включающий разработку многоуровневой модели угроз для БПЛА, которая охватывает общий анализ угроз на всем маршруте полета, кластерные модели для групп участков траектории и частные модели для отдельных сегментов маршрута. Упомянутый в [7] метод позволяет систематизировать угрозы по степени специфичности и масштабу воздействия, обеспечивая гибкость оценки рисков в зависимости от оперативной обстановки.

В работе [8] предложена модель угроз для БПЛА специального назначения, ориентированная на учет уникальных факторов, обусловленных высокой степенью конфиденциальности задач и критичности выполняемых функций; модель включает анализ уязвимостей, связанных с киберфизическими атаками, физическим захватом аппаратов и нарушением целостности данных в условиях противодействия.

Вместе с тем, для разработки комплексной модели угроз БПЛА как элемента ИТС необходимо учиты-

вать не только технические уязвимости, но и риски, связанные с нарушением логистических цепочек, киберфизическими атаками на инфраструктуру системы диспетчеризации, несанкционированным доступом к данным о маршрутах перемещения объектов транспортной системы. Архитектура БПЛА является программно-аппаратным комплексом (ПАК), состоящим из бортового компьютера, систем навигации и связи, модулей энергопитания, а также программного обеспечения (ПО) для планирования полетов, обработки данных и взаимодействия с внешними системами (рис. 1).

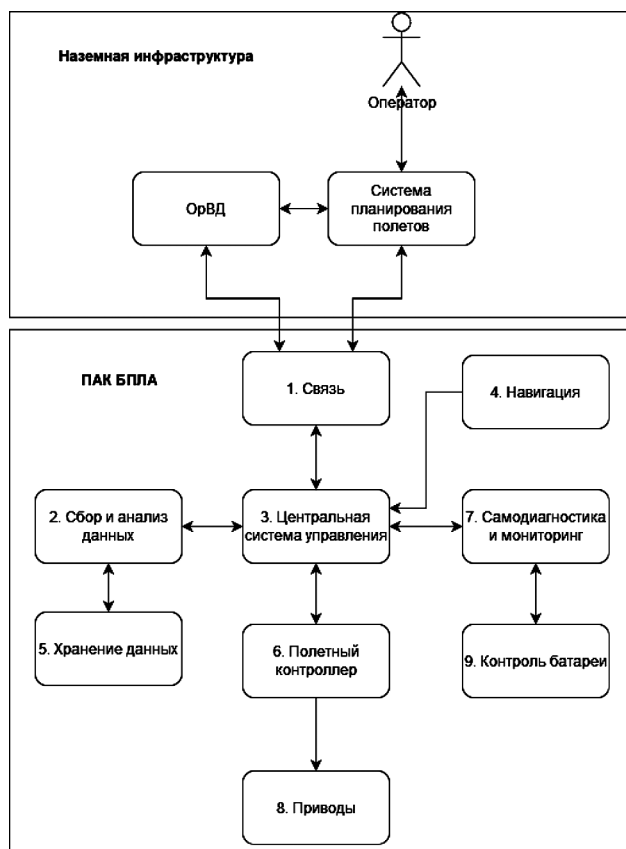


Рис. 1. Общая архитектура БПЛА

На основании рассмотренной архитектуры и проведенного анализа авторами разработана модель угроз БПЛА, выделены ключевые объекты воздействия, на которые могут быть направлены угрозы, а также возможные последствия реализованных угроз.

Далее перечислим все объекты воздействия, которые охватывают как внутренние компоненты БПЛА, так и внешние элементы взаимодействия с транспортной системой:

1) Аппаратные компоненты БПЛА

1.1) Бортовой компьютер и процессоры потенциально уязвимы к физическому повреждению, перехвату или изменению (модификации) при обслуживании.

1.2) Датчики (GPS, гироскопы, камеры) подвержены манипуляциями с данными (например, подмена GPS-координат, блокировка видеопотока).

1.3) Энергетическая система (аккумуляторы, двигатели) имеет риск перегрева, дистанционного отключения или физического разрушения.

2) Программное обеспечение (ПО) БПЛА

2.1) Алгоритмы автономного управления подвержены угрозам эксплуатации ошибок в ПО (например, ошибки в навигационных алгоритмах, уязвимости в системах обнаружения препятствий).

2.2) Операционная система подвержена внедрению вредоносного ПО или перезаписи подпрограмм для перехвата контроля управления.

2.3) Симуляторы и обучающие платформы обладают риском формирования у операторов навыков, не учитывающих реальные угрозы (например, игнорирование методов противодействия помехам связи).

3) Коммуникационные каналы

3.1) Радиоканалы связи с наземной станцией подвержены помехам, прослушиванию или перехвату сигнала.

3.2) Интеграция с внешними сетями (Wi-Fi, 4G/5G, спутниковые каналы) дает возможность осуществить MITM-атаку (man-in-the-middle), фишинг или использовать уязвимые протоколы передачи данных.

3.3) Интерфейсы API для взаимодействия с системами управления воздушным движением имеет риск несанкционированного доступа.

4) Данные и информационные потоки

4.1) Маршруты полета и траектории движения могут быть перехвачены или в них могут быть внесены изменения данных о координатах для отклонения БПЛА от курса.

4.2) Геоданные могут быть подделаны или удалены, что несет риск для логистики.

4.3) Персональные данные пассажиров/грузов подвержены риску утечки через возможные уязвимости в системах учета или облачных хранилищах.

5) Наземная инфраструктура

5.1) Наземные станции управления (НСУ) обладают уязвимостью к кибератакам (например, DDoS, компрометация серверов планирования полетов).

5.2) Системы организации воздушного движения (ОрВД) подвержены риску нарушения координации полетов из-за изменений в документации или аэронавигационной информации.

5.3) Сервисы страхования и рейтинговых оценок могут быть скомпрометированы и в них могут быть сфальсифицированы данные о состоянии БПЛА или репутации операторов.

Реализация угроз, связанных с эксплуатацией БПЛА, может повлечь за собой широкий спектр негативных последствий. С технической точки зрения возможна полная или частичная потеря управления воздушным судном, что может быть обусловлено как программными сбоями, так и физическим повреждением или выходом из строя критически важных компонентов бортового оборудования. Кроме того, нарушение целостности ПО, включая его несанкционированную модификацию или компрометацию, способно привести к некорректному

функционированию систем навигации, связи и управления. На операционном уровне реализация угрозы может спровоцировать срыв выполнения логистических задач, особенно в условиях высокой зависимости от автоматизированных доставок, что в свою очередь, может нарушить координацию воздушного движения, особенно в зонах интенсивного использования воздушного пространства, а также вызвать сбои в функционировании наземной инфраструктуры, включая системы управления полетами и пункты приема-передачи грузов. С юридической и регуляторной перспективы возникают риски несоблюдения нормативных требований, которые касаются обработки персональных и иных защищенных данных, что может повлечь административную или уголовную ответственность. В случае причинения физического ущерба – например, при падении БПЛА вследствие ошибки в ПО – возникает сложный вопрос о распределении ответственности между разработчиками, операторами, владельцами и регулируемыми органами. Дополнительные правовые сложности могут быть связаны с компрометацией доказательственной базы, что затрудняет расследование инцидентов и установление причинно-следственных связей.

2. Разработка модели угроз БПЛА

Авторами разработана модель угроз БПЛА. В связи с тем, что модель угроз занимает большой объем, в статье приведен анализ модели угроз. Так, например, на рис. 2 представлены объекты воздействия, можно отметить, что наиболее часто подвергаемые угрозам объекты в соответствии с разработанной моделью, являются: О.1-Автоматизированное рабочее место оператора, О.2-Сервер, О.3-Периферийное оборудование, О.6-Активное сетевое оборудование (далее по тексту используются названия объектов, угроз и средств защиты в соответствии с классификацией ФСТЭК¹).

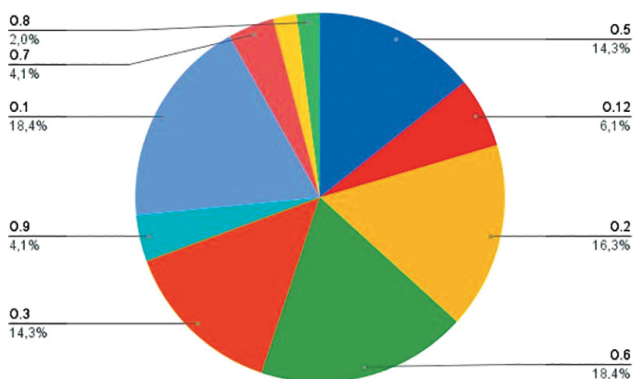


Рис. 2. Диаграмма распределения объектов воздействия, рассмотренных в разработанной модели угроз БПЛА

Угрозы ИБ, рассмотренные в разработанной модели, приведены на рис. 3, можно отметить, что УБИ.8² – Угро-

за нарушения функционирования (работоспособности) наиболее встречающийся вид угроз, дополнительно критичными являются угрозы, воздействующие на коммуникационные каналы, целостность данных и физическую безопасность БПЛА, т.к. они способны нарушить функционирование всей транспортной системы.

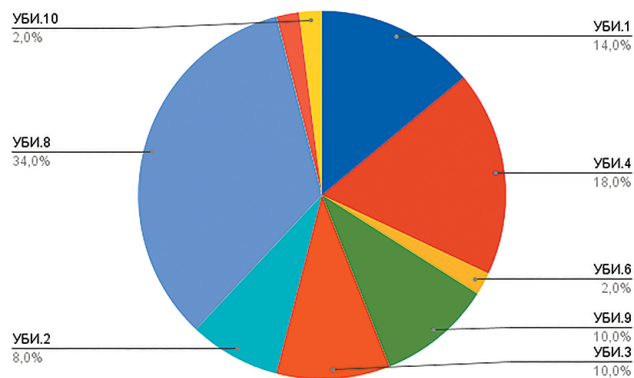


Рис. 3. Диаграмма распределения угроз ИБ, представленных в разработанной модели

Анализируя модель угроз, авторы провели анализ типов ПО, которое чаще всего встречается для защиты от угроз ИБ при использовании БПЛА. При построении модели угроз авторами было рассмотрено более 60-ти программных продуктов, которые могут быть использованы для защиты. Все рассмотренные продукты были классифицированы по типам, на рис. 4 представлена диаграмма распределения типа рассмотренного ПО. Следует отметить, что для предотвращения угроз чаще всего применяется физические способы защиты, внедрение методов управления уязвимостями, применение шифрования данных и также применение систем аутентификации и авторизации пользователей.

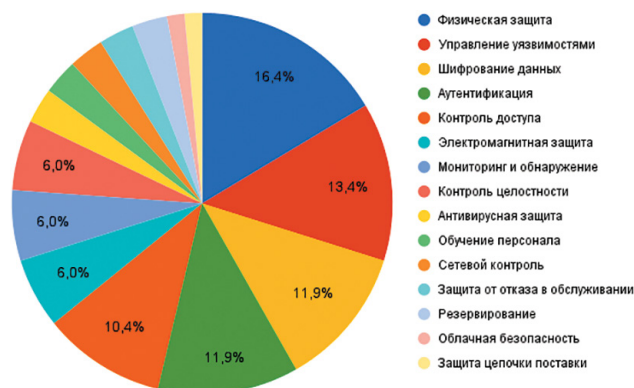


Рис. 4. Диаграмма распределения ПО для защиты от угроз, представленных в разработанной модели

На рис. 5 представлена схема взаимоотношения угроз, объектов и средств защиты ИБ, на которой показано, что отсутствует комплексная система защиты, что увеличивает общее количество уязвимостей ИТС при использовании БПЛА в случае выполнении соответствующего функционала.

¹ URL: <https://bdu.fstec.ru/threat-section/threats>

² URL: <https://bdu.fstec.ru/threat-section/threats>

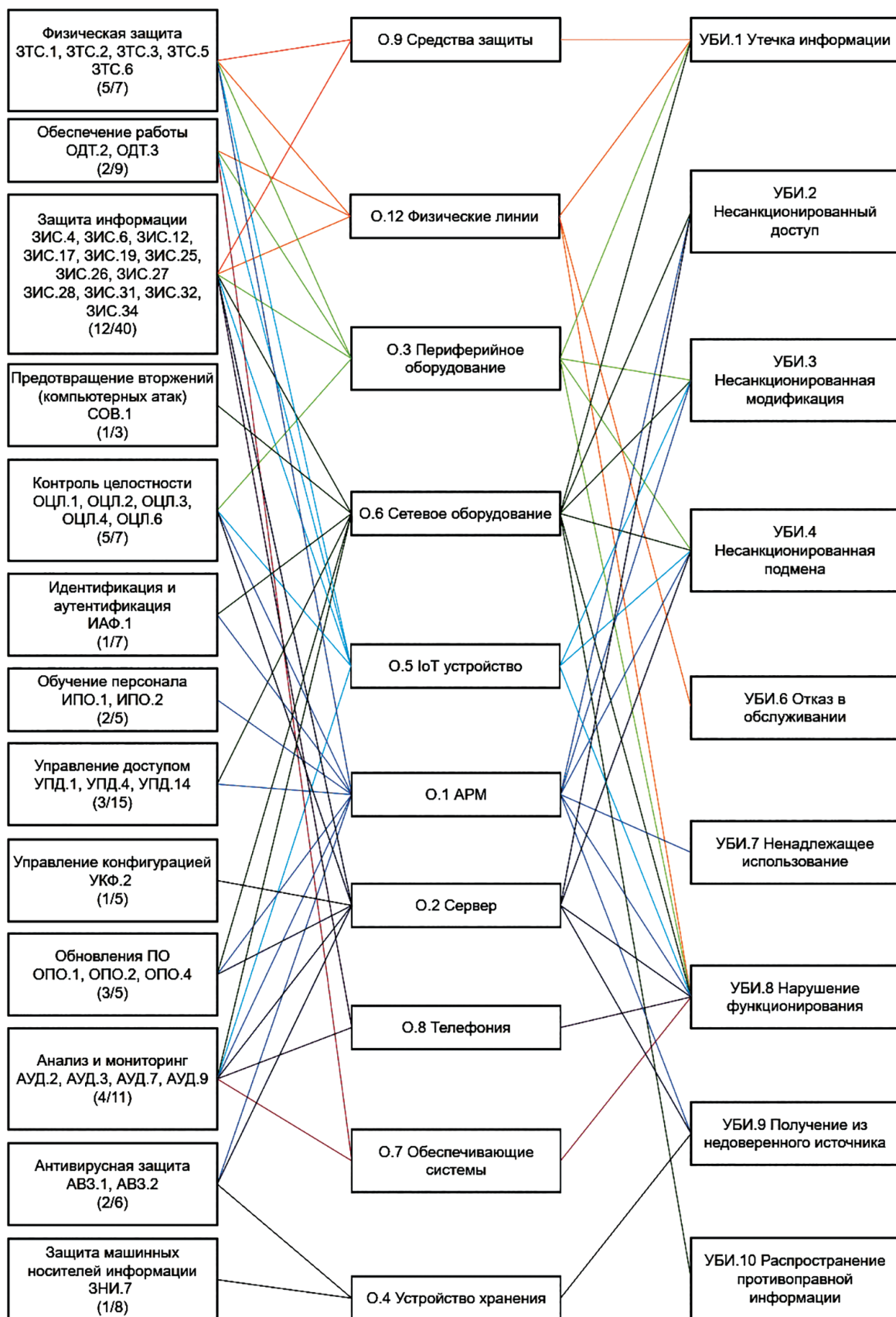


Рис. 5. Схема взаимоотношения угроз, объектов и средств защиты ИБ¹

¹ URL: <https://bdu.fstec.ru/threat-section>

3. Конструктивная информационная безопасность

Указанные недостатки свидетельствуют о необходимости перехода от традиционных подходов к активной защите, встроенной в архитектуру системы модели безопасности. В качестве такого решения в последние годы активно развивается концепция кибериммунитета, предложенная «Лабораторией Касперского», которая легла в основу формирования отечественного подхода к проектированию систем, устойчивых к угрозам ИБ. Ключевые принципы концепции были систематизированы и стандартизированы в рамках национального документа ГОСТ Р 72118-2025 «Защита информации. Системы с конструктивной информационной безопасностью. Методология разработки» (КИБ) [9].

Стандарт разработан ФСТЭК, «Лаборатория Касперского» и ИСП РАН – группа ключевых носителей практики в области ИБ. Проектирование и конструирование защищенного БПЛА, применимого в ИТС, возможно на основе методологии разработки систем с КИБ, при этом упомянутый принцип позволяет создавать ПАК, которые не только устойчивы к внешним и внутренним угрозам, но и способны быстро восстанавливаться после возможных сбоев.

На кафедре «Управление и защита информации» накоплен значительный опыт разработки систем с КИБ. Так, например, студенты кафедры с 2022-23 годы участвовали в первом и втором хакатоне Лаборатории Касперского, посвященному КИБ [10], в 2023 году выпускник кафедры в составе команды *GenericBoys* разработал архитектуру и прототип конструктивно защищенного БПЛА для мониторинга трубопроводов, которая получила первое место на хакатоне по Кибериммунной разработке [11]. Студенты кафедры и преподаватели регулярно участвуют в соревнованиях по кибериммунитету, так, например, команда студентов под руководством Логиновой Л.Н. участвовала в 2024-2025 гг. в инженерных соревнованиях в компетенции «Кибериммунная автономность» в рамках проектно-образовательного интенсива Архипелаг, посвященный проектированию БАС [12]. На кафедре «Управление и защита информации» РУТ(МИИТ) Домашкиным А.Д. была успешно защищена первая дипломная работа в 2023 г. на тему «Разработка методики внедрения кибериммунного подхода в решении задач информационной безопасности в транспортной отрасли [13], после этого тематика КИБ стала популярной для рассмотрения в дипломных проектах.

Заключение

На основе накопленного опыта и успешно выполненных задач авторы предлагают в дальнейшем использовать методологию КИБ для проектирования

архитектуры безопасного БПЛА, предназначенного для интеграции в ИТС. Данный подход позволит заложить свойства КИБ на ранних этапах жизненного цикла разработки – от анализа требований и моделирования угроз до проектирования аппаратно-программных компонентов и механизмов самодиагностики. Использование стандарта ГОСТ Р 72118-2025 в сочетании с практиками, апробированными в ходе хакатонов и проектно-образовательных инициатив, обеспечит создание БПЛА, способного не только противостоять целенаправленным атакам, но и сохранять функциональность в условиях неопределенности и динамически изменяющихся угроз, что особенно критично для транспортной инфраструктуры.

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

Список литературы

1. Розенберг И.Н. Методы и алгоритмы создания интеллектуальных геоинформационных систем для управления транспортными процессами / И.Н. Розенберг, С.Л. Беляков, А.В. Боженок [и др.]; под ред. И.Н. Розенберга. М.: ВИНТИ РАН, 2019. 289 с.
2. Шубинский И.Б. Надежность, риски, безопасность систем управления на железнодорожном транспорте: монография / И.Б. Шубинский, Е.Н. Розенберг, А.В. Бочков. М., Вологда: Инфра – Инженерия, 2024. 416 с.
3. Баранов Л.А. Моделирование и оценка рисков безопасности интеллектуальных систем водного транспорта / Л.А. Баранов, Н.Д. Иванова, И.Ф. Михалевич // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11. № 1. С. 7-15. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-7-15 EDN FBRTKV. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80472960>
4. Использование беспилотных летательных средств: опыт, перспективы, проблемы / А.Д. Домашкин, Л.Н. Логинова, А.И. Ковров [и др.] // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2025. С. 517-525. DOI 10.30932/9785002587582-2025-517-525 EDN НПУVX.
5. Баранов Л.А., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г. Развитие интеллектуальных систем управления электрическим транспортом Автоматика, связь, информатика. 2025. № 10. С. 30–32.
6. Зайкова С.Н., Виноградский Д.Д. Беспилотные транспортные средства (аппараты) как угроза транспортной безопасности // Вестник СГЮА. 2024. №1(156). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-transportnye-sredstva-apparaty-kak-ugroza-transportnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 23.03.2025).
7. Аралбаев Т.З., Галимов Р.Р., Гетьман М.А. и др. Иерархический анализ рисков моделей угроз беспилотных

летательных аппаратов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ierarhicheskiy-analiz-riskov-modeley-ugroz-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 16.07.2025).

8. Винокуров А.В. Анализ уязвимостей комплексов с беспилотными летательными аппаратами и классификация угроз безопасности циркулирующей в них информации // *I-methods*. 2016. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-uyazvimostey-kompleksov-s-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami-i-klassifikatsiya-ugroz-bezopasnosti-tsirkuliruyushey-v-nih> (дата обращения: 11.10.2025).

9. ГОСТ Р 72118-2025 Защита информации. Системы с конструктивной информационной безопасностью. Методология разработки. М.: Российский институт стандартизации, 2025. IV, 45 с.

10. Повышение HardSkill с помощью соревнований по CTF / Л.Н. Логинова, Р.А. Бобков, С.А. Костенко [и др.] // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года. М.: Российский университет транспорта, 2023. С. 789-793. DOI 10.30932/9785002182794-2023-789-793 EDN DTKGRL.

11. Как прошел хакатон «Лаборатории Касперского» по проектированию дронов. URL: <https://codenrock.com/blog/kak-proshel-hakaton-laboratorii-kasperskogo-po-proektirovaniyu-dronov/> (дата обращения: 11.08.2025).

12. Логинова Л.Н., Галыба Л.Д., Степанов Д.Е. Командный дух и инновации: участие в хакатоне по киберимунной автономности // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. М.: Российский университет транспорта, 2025. С. 878-886.

13. Логинова Л.Н., Домашкин А.Д. Применение принципов кибериммунитета для обеспечения безопасности в транспортных системах // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. С. 645-649. DOI 10.30932/9785002446094-2024-645-649 EDN HCNJYS.

References

1. Rozenberg I.N., Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V. et al. Rozenberg I.N., editor. [Methods and algorithms for creating intelligent geographic information systems for transportation process management]. Moscow: VINITI RAS; 2019. (in Russ.)

2. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N, Bochkov A.V. [Dependability, risks, safety of control systems in railway transportation: a monograph]. Vologda: Infra-Engineering; 2024. (in Russ.)

3. Baranov L.A., Ivanova N.D., Mihalevich I.F. Modelling and Assessment of Security Risks of Intelligent Water Transport Systems. *Transport automation research* 2025;1:7-15. (in Russ.) DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-7-15 EDN FBRTKV. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80472960>.

4. Domashkin A.D., Loginova L.N., Kovrov A.I. et al. [Use of unmanned aerial vehicles: experience, prospects, problems]. In: [Intelligent transportation systems: Proceedings of the IV International science and practice conference]. Moscow; May 22, 2025. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2025. Pp. 517-525. (in Russ.) DOI 10.30932/9785002587582-2025-517-525 EDN HIIYVX.

5. Baranov L.A., Safronov A.I., Sidorenko V.G. Development of Intelligent Control Systems for Electric Transport. *Automation, communications, informatics* 2025;10:30-32. (in Russ.)

6. Zaikova S.N., Vinogradsky D.D. Unmanned vehicles (airships) as a threat to transportation security. (accessed: 23.03.2025). *SSLA Bulletin* 2024;1(56). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-transportnye-sredstva-apparaty-kak-ugroza-transportnoy-bezopasnosti>. (in Russ.)

7. Aralbaev T.Z., Galimov R.R., Getman M.A. et al. Hierarchical risk analysis of unmanned aerial vehicle threat models. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics* 2023;23(2):241-252. (accessed: 16.07.2025). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ierarhicheskiy-analiz-riskov-modeley-ugroz-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov>. (in Russ.)

8. Vinokurov A.V. Vulnerability analysis complexes with unmanned aerial vehicles and classification of security threats circulating information in them. *I-methods* 2016;1. (accessed: 11.10.2025). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-uyazvimostey-kompleksov-s-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami-i-klassifikatsiya-ugroz-bezopasnosti-tsirkuliruyushey-v-nih>. (in Russ.)

9. GOST R 72118-2025. Information protection. Systems secure by design. Development methodology. Moscow: Russian Standardization Institute; 2025. (in Russ.)

10. Loginova L.N., Bobkov R.A., Kostenko S.A. et al. [Improving Hard Skills through CTF competitions]. In: [Intelligent transportation systems: Proceedings of the II International science and practice conference]. Moscow; May 25, 2023. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2023. Pp. 789-793. (in Russ.) DOI 10.30932/9785002182794-2023-789-793 EDN DTKGRL.

11. How was Kaspersky Lab's drone design hackathon. (accessed: 11.08.2025). Available at: <https://codenrock.com/blog/kak-proshel-hakaton-laboratorii-kasperskogo-po-proektirovaniyu-dronov/>. (in Russ.)

12. Loginova L.N., Galyba L.D., Stepanov D.E. [Team spirit and innovation: participation in the hackathon on cyberimmune autonomy]. In: [Intelligent transportation systems: Proceedings of the IV International science and

practice conference]. Moscow; May 22, 2025. Moscow: Russian University of Transport; 2025. Pp. 878-886. (in Russ.)

13. Loginova L.N., Domashkin A.D. [Applying cyberimmunity principles to ensure security in transportation systems]. In: [Intelligent transportation systems: Proceedings of the III International science and practice conference]. Moscow; May 30, 2024. Moscow: Russian University of Transport (МИИТ); 2024. Pp. 645-649. DOI 10.30932/9785002446094-2024-645-649 EDN HCNJYS. (in Russ.)

Сведения об авторах

Домашкин Алексей Дмитриевич (Aleksey D/ Domashkin) – аспирант кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (Russian University of Transport (МИИТ)), Российская Федерация, Москва, e-mail: mail@adomashkin.ru

Логина Людмила Николаевна (Lyudmila N/ Loginova) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (Russian University of Transport (МИИТ)), Российская Федерация, Москва, e-mail: ludmilanv@mail.ru

Ковров Артем Игоревич (Artiom I/ Kovrov) – студент кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (Russian University of Transport (МИИТ)), Российская Федерация, Москва, e-mail: kovrov_tema@mail.ru

About the authors

Alexey D. Domashkin, Postgraduate Student, Department of Information Management and Protection, Russian University of Transport (МИИТ), Russian Federation, Moscow, e-mail: mail@adomashkin.ru.

Lyudmila N. Loginova, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer, Department of Information Management and Protection, Russian University of Transport (МИИТ), Russian Federation, Moscow, e-mail: ludmilanv@mail.ru .

Artyom I. Kovrov, Student, Department of Information Management and Protection, Russian University of Transport (МИИТ), Russian Federation, Moscow, e-mail: kovrov_tema@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Домашкин А.Д. – разработка модели угроз БПЛА как элемента ИТС, охватывающая аппаратные компоненты, ПО, коммуникационные каналы, информационные потоки и наземную инфраструктуру.

Логина Л.Н. – анализ архитектуры ПАК БПЛА с выделением ключевых объектов воздействия.

Ковров А.И. – выявление наиболее критичных угроз БПЛА, включая нарушение функционирования, компрометацию данных и физическое воздействие.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Предметно-ориентированная информационная модель объектов железнодорожной автоматики на базе архитектуры OPC UA как способ снижения сложности конфигурации и повышения функциональной безопасности

An OPC UA-based subject-oriented information model of railway signalling assets as a way of reducing configuration complexity and improving functional safety

Змиев Т.Б.¹, Радковский С.А.¹, Трунаев А.М.^{2*}
Zmiyov T.B.¹, Radkovsky S.A.¹, Trunayev A.M.^{2*}

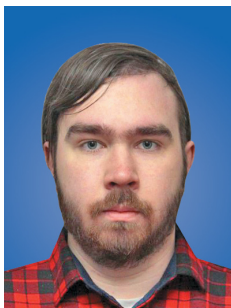
¹ Донецкий институт железнодорожного транспорта, Донецкая Народная Республика, Донецк

² Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, Ростов

¹ Donetsk Institute of Railway Transport, Donetsk People's Republic, Donetsk

² Rostov State Transport University, Russian Federation, Rostov

* andrey.trunayev@mail.ru



Змиев Т.Б.



Радковский С.А.



Трунаев А.М.

Аннотация. В статье рассматривается проблема интеграции микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и систем диспетчерского контроля (SCADA). Традиционные сетевые протоколы с плоской адресацией памяти порождают семантический разрыв между физическим оборудованием и абстракциями управления движением, что увеличивает алгоритмическую сложность конфигурации и снижает уровень функциональной безопасности. Целью исследования является разработка предметно-ориентированной информационной модели базовых объектов напольного оборудования (стрелочный перевод, путевая секция, светофор) на основе стандарта IEC 62541 (OPC UA). В работе предложен метод инкапсуляции логики технологических блокировок централизации непосредственно в сетевой стек протокола с использованием программных вызовов (методов) и динамического управления системным атрибутом разрешения выполнения. Теоретически обосновано, что применение механизмов наследования свойств и машинного самоописания объектов контроллером позволяет снизить алгоритмическую сложность настройки автоматизированных рабочих мест с линейно-мультипликативной размерности $O(N \times M)$ до $O(N)$. Результаты исследования подтверждают повышение защищенности систем от логических атак и ошибок оператора. Предложенная иерархия типов данных может служить прототипом для создания унифицированной отраслевой спецификации взаимодействия систем железнодорожной автоматики.

Abstract. The paper addresses the problem of integrating computer-based railway signalling systems with supervisory control and data acquisition (SCADA) systems. Conventional network protocols with flat memory addressing create a semantic gap between physical equipment and traffic control abstractions, which exponentially increases the algorithmic complexity of configuration and diminishes cyber-physical security. The aim of the study is to develop a domain-specific information model for basic trackside assets (railway switch, route section, signal) based on the IEC 62541 (OPC UA) standard. The paper proposes a method for encapsulating the fail-safe interlocking logic directly into the protocol's network stack using software calls (methods) and dynamic management of the execution permission system attribute. It is mathematically proven that applying property inheritance and machine self-description mechanisms allows reducing the algorithmic complexity of operator workstation configuration from a linear-multiplicative dimension of $O(N \times M)$ to $O(N)$. The findings confirm an improved system protection against logical attacks and operator errors. The proposed data type hierarchy can serve as a prototype for creating a single industry specification for the interaction of railway signalling systems.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика, микропроцессорная централизация, информационная модель, семантический разрыв, функциональная безопасность, информационная совместимость, OPC UA.

Keywords: railway signalling, computer-based interlocking, information model, semantic gap, functional safety, information compatibility, OPC UA.

Для цитирования: Змиев Т.Б., Радковский С.А., Трунаев А.М. Предметно-ориентированная информационная модель объектов железнодорожной автоматики на базе архитектуры OPC UA как способ снижения сложности конфигурации и повышения функциональной безопасности // *Надежность*. 2026. №2. С. 59-65. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-59-65>

For citation: Zmiyov T.B., Radkovsky S.A., Trunayev A.M. An OPC UA-based subject-oriented information model of railway signalling assets as a way of reducing configuration complexity and improving functional safety. *Dependability* 2026;2: 59-65. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-59-65>

Поступила: 11.02.2026 / **После доработки:** 25.03.2026 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 11.02.2026 / **Revised on:** 25.03.2026 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) переживают этап глубокой цифровой трансформации, основу которой составляет переход к микропроцессорным системам централизации (МПЦ). В архитектуре таких систем критически важным звеном является организация надежного информационного обмена между программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), выполняющими алгоритмы технологических блокировок, и системами верхнего уровня – автоматизированными рабочими местами (АРМ) дежурного по станции и электромеханика.

Традиционный подход к интеграции оборудования базируется на использовании сетевых протоколов с «плоской» адресацией памяти (например, Modbus TCP или ранние спецификации OPC Data Access). При таком подходе технологическая информация передается в виде неструктурированного массива битовых и аналоговых переменных (тегов). Это порождает фундаментальную проблему семантического разрыва: для сетевого стека и системы визуализации (SCADA) передаваемые данные лишены технологического смысла, связь между датчиками положения стрелки и командой на ее перевод существует только в проектной документации и сознании инженера-разработчика.

Наличие семантического разрыва приводит к двум критическим системным недостаткам. Во-первых, кратно возрастает трудоемкость конфигурации автоматизированных рабочих мест (АРМ дежурного персонала): для станции, содержащей N технологических объектов (каждый из которых имеет M параметров), инженеру требуется выполнить $N \times M$ операций ручной привязки переменных к графическим элементам мнемосхемы. При масштабировании станции сложность инжиниринга растет линейно-мультипликативно, однако вероятность внесения критических ошибок из-за человеческого фактора (при работе с неструктурированным массивом из сотен тегов) возрастает нелинейно. Во-вторых, снижается уровень функциональной безопасности: при плоской адресации управляющие переменные открыты для прямой записи. В случае программного сбоя АРМ или ошибочных действий оператора опасная команда транслируется напрямую в память ПЛК, и обеспечение безопасности движения полностью возлагается на внутренние алгоритмы контроллера.

Решением данных проблем является переход к структурному семантическому моделированию на базе международного стандарта IEC 62541 (OPC UA). Однако задача заключается не в простой замене транспортного протокола, а в разработке предметно-ориентированной информационной модели (онтологии), которая позволит транслировать строгие алгоритмы железнодорожной автоматики непосредственно в атрибуты адресного пространства сети, превратив контроллер в систему с функциями машинного самоописания.

1. Анализ последних исследований и публикаций

Анализ современной научно-технической литературы показывает устойчивый тренд на отказ от проприетарных протоколов связи в пользу открытых стандартов, обеспечивающих семантическую информационную совместимость между подсистемами автоматики и кибер-физическими системами в контексте Индустрии 4.0 и цифровой трансформации транспорта [1, 2]. Стандарт OPC Unified Architecture (OPC UA) рассматривается как ведущий механизм обмена данными и моделирования объектов в промышленности благодаря расширяемой объектно-ориентированной модели [1].

В работах по промышленной автоматизации указывается, что традиционные методы адресации данных на основе плоских таблиц тегов ограничивают масштабирование систем управления и конфигурацию SCADA-сред [1, 3].

Значительное внимание уделяется разработке цифровых двойников (Digital Twins) для мониторинга и предиктивного обслуживания элементов железнодорожной инфраструктуры [4, 5, 6]. Российские исследования также показывают интеграцию DT-подходов с методами оценки параметров готовности и управления надежностью технических систем с использованием цифровых моделей [5].

В отечественной научной литературе обсуждается развитие интеллектуальных транспортных систем с использованием BIM-моделирования, IoT-сетей и методов искусственного интеллекта (ИИ) для повышения надежности, и эффективности инфраструктуры железных дорог [7]. Материалы профильных журналов по железнодорожной автоматике подчеркивают перспективы внедрения цифровых технологий в системы управления

движением и эксплуатационную поддержку, а также необходимость унификации данных для интеграции различных подсистем [8].

Практические публикации в журнале *Автоматика, связь, информатика* поднимают вопросы внедрения сквозных цифровых технологий на железнодорожном транспорте и анализируют современные реалии цифровизации систем управления станциями и тех-процессами [9].

Однако анализ исследований по информационным моделям указывает на нехватку готовых практических шаблонов (Types) и правил именования для железнодорожной автоматики, что осложняет интеграцию оборудования разных производителей и разработку унифицированных рабочих мест операторов [1, 3, 6].

Таким образом, несмотря на активное обсуждение преимуществ OPC UA и цифровых двойников в научной среде, сохраняется необходимость разработки специализированных информационных моделей и стандартов данных, ориентированных на задачи контроля и управления в железнодорожной автоматике [1, 5, 7].

2. Цель работы

Целью данного исследования является разработка и теоретическое обоснование семантической информационной модели объектов железнодорожной автоматики (на базе архитектуры OPC UA), обеспечивающей встроенный механизм функциональной защиты и автоматизацию конфигурации подсистемы АРМ на базе SCADA.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

Разработка иерархии базовых типов данных (шаблонов) для ключевых элементов напольного оборудования (на примере стрелочного перевода, путевой секции и светофора), устраняющей семантический разрыв между физическими сигналами и логическими статусами объектов.

Снижение алгоритмической сложности конфигурации систем верхнего уровня с размерности $O(N \times M)$ до $O(N)$ за счет применения механизмов наследования свойств и автоматического обнаружения структуры объектов сервером.

Разработка метода повышения функциональной безопасности управления путем инкапсуляции технологических блокировок СЦБ в сетевой стек протокола с использованием программных вызовов (методов) и динамического управления правами исполнения, исключающего прямую модификацию памяти контроллера.

3. Основная часть

Первым и наиболее массовым объектом автоматизации на любой железнодорожной станции является стрелочный перевод. С точки зрения технологического процесса, он представляет собой не просто механизм с двумя дискретными состояниями, а сложный объект,

требующий строгого контроля переходных процессов, учета временных характеристик и разделения каналов мониторинга и управления.

Процесс семантического моделирования начинается с проектирования абстрактного шаблона – базового типа объекта. Для стрелочного перевода в адресном пространстве сервера формируется тип `RailwaySwitchType` (рис. 1). На уровне архитектуры закладывается фундаментальное правило пространственного именования: системные идентификаторы узлов (`BrowseName`) задаются строго на латинице для обеспечения программной совместимости сценариев автоматизации, в то время как атрибуты отображаемого имени (`DisplayName`) поддерживают локализацию и содержат понятное оператору описание на русском языке.

| ATTRIBUTE | VALUE |
|----------------|--------------------------|
| NodeId | ns=2;i=1 |
| NamespaceIndex | 2 |
| IdentifierType | Numeric |
| Identifier | 1 |
| NodeClass | ObjectType |
| BrowseName | 2, "RailwaySwitchType" |
| DisplayName | "" , "RailwaySwitchType" |
| Description | "" , "RailwaySwitchType" |
| IsAbstract | false |
| WriteMask | 0 |
| UserWriteMask | 0 |

Рис. 1. Информационная модель `RailwaySwitchType` в нотации UaExpert

Для обеспечения однозначного определения состояний «Плюс» или «Минус» системой визуализации в модель введены две независимые булевы переменные: `SensorPlus` (контроль плюсового положения) и `SensorMinus` (контроль минусового положения). Дополнительно тип включает аналоговую переменную `MovementTime` (время перевода) – диагностический параметр, позволяющий отслеживать механическую деградацию привода и формировать данные для подсистем предиктивного обслуживания.

Управление стрелочным переводом реализовано не через классическую запись значений в регистры памяти, а через встроенный механизм вызова программных процедур – методов (Methods). В структуре типа определены методы `MoveToPlus` и `MoveToMinus`. В отличие от изменения бита в плоской таблице тегов, вызов метода представляет собой атомарную сетевую транзакцию, которая гарантирует передачу команды как единого события и может возвращать диагностический код результата.

Переход от абстрактной модели к физической топологии станции осуществляется через механизм инстанцирования – создания экземпляров объектов на основе заданного типа. Рассмотрим этот процесс на примере стрелки № 7. В адресном пространстве сервера создается объект с системным именем `Switch_07`, который жестко связан с родительским типом `RailwaySwitchType` посредством ссылки определения типа (рис. 2). Благодаря этому механизму SCADA система при подключении к

контроллеру способна выполнить автоматическое обнаружение объекта и самостоятельно развернуть типовую экранную форму управления, снижая алгоритмическую сложность настройки АРМ.

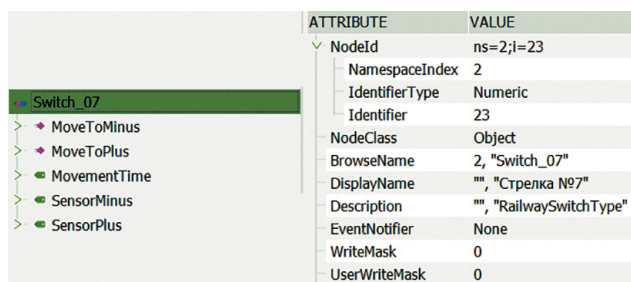


Рис. 2. Модель экземпляра «Стрелка № 7» в нотации UaExpert

При создании экземпляра модель адаптируется под параметры конкретного напольного оборудования. Например, если стрелка № 7 является пологой и оснащена несколькими приводами, время ее перевода может превышать стандартные значения. В модели это отражается путем переопределения свойства EURange внутри переменной MovementTime: устанавливается индивидуальный допустимый диапазон от 0 до 15 секунд. Это позволяет корректно масштабировать шкалы и уставки тревог на АРМ без изменения логики обработки остальных стрелок станции.

Ключевой особенностью предложенной модели является метод повышения функциональной безопасности посредством инкапсуляции технологических блокировок. В традиционных системах контроллер циклически принимает управляющие биты от АРМ и проверяет их безопасность в основном цикле программы. В случае компрометации системы визуализации или ошибки диспетчера опасная команда может передаться в память контроллера.

В разработанной архитектуре защита реализуется на уровне сетевого стека протокола за счет динамического управления атрибутом разрешения на выполнение – Executable. Внутренняя логика электрической централизации ПЛК непрерывно связывает состояние путевых блокировок с данным атрибутом методов управления. Если путевая секция, в которую входит стрелка № 7, занята подвижным составом или замкнута в маршруте, микропроцессорная логика динамически переводит атрибут Executable методов MoveToPlus и MoveToMinus в состояние «Ложь» (False).

Следствием данного архитектурного решения является то, что любая попытка несанкционированного или ошибочного вызова метода со стороны АРМ будет отклонена самим коммуникационным сервером (с возвратом кода ошибки Bad_NotExecutable) еще до передачи команды в прикладную программу контроллера. Таким образом, семантическая модель транслирует строгие правила безопасности железнодорожной автоматики непосредственно в свойства адресного пространства,

формируя дополнительный эшелон защиты от логических атак и ошибок человеческого фактора.

Наравне с исполнительными механизмами, критически важным элементом цифровой информационной модели станции являются логические объекты путевой топологии, в частности – **путевые секции**. Рассмотрим реализацию данного класса на примере экземпляра «Секция 7СП» (Section_7SP), топологически связанного с ранее рассмотренной стрелкой и созданного на базе родительского типа RouteSectionType. В отличие от стрелочного перевода, путевая секция обладает сложной логикой состояний, где физическая занятость пути подвижным составом и программное замыкание в маршруте могут существовать независимо друг от друга. В адресном пространстве созданного экземпляра эти сущности строго разделены: переменная IsOccupied отражает аппаратные данные от путевых приемников, а IsLocked – статус логической блокировки централизации (рис. 3).

Особое значение при моделировании секции приобретает реализация ответственных команд, таких как искусственная разделка (принудительное размыкание) секции маршрута. В предложенной модели данная процедура инициализируется исключительно через вызов защищенного метода SelectForRelease. Переменная, отображающая на АРМ статус выбора секции оператором (IsSelectedForRelease), имеет системный атрибут доступа только для чтения. Это архитектурное решение на уровне сетевого стека исключает возможность несанкционированной имитации действий диспетчера путем прямой модификации памяти контроллера извне, гарантируя, что индикация выбора появится на экране только после того, как логика блокировок действительно примет и верифицирует команду.

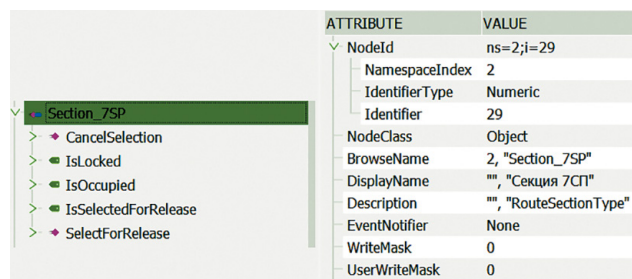


Рис. 3. Модель экземпляра «Секция 7СП» в нотации UaExpert

Завершает базовую архитектуру напольного оборудования класс объектов индикации – светофоры. Главной проблемой при их семантическом моделировании является высокая вариативность аппаратного исполнения: в пределах одной станции могут функционировать входные, выходные, маршрутные, маневровые и т.д. светофоры. Создание уникального типа данных под каждую возможную комбинацию линз привело бы к необоснованной избыточности программного кода.

Для решения этой задачи разработан универсальный шаблон, на примере выходного светофора (ExitSignalType), в полной мере использующий механизм опционального моделирования стандарта OPC UA (ModellingRule: Optional). Гибкость данного подхода наглядно демонстрируется на экземпляре выходного светофора Н1 (рис. 4).

Поскольку физический светофор Н1 является совмещенным (выполняет функции как поездного, так и маневрового), при инстанцировании данного объекта на сервере активируется расширенный набор заложенных в типе опций. В дереве экземпляра, помимо обязательных узлов поездного показания (запрещающий сигнал IsStop и разрешающий IsOpen), создаются опциональные узлы маневрового сигнала (IsShuntingActive) и соответствующий метод задания маневрового маршрута (PressShuntingRouteButton).

| ATTRIBUTE | VALUE |
|----------------|----------------|
| NodeId | ns=2;i=47 |
| NamespaceIndex | 2 |
| IdentifierType | Numeric |
| Identifier | 47 |
| NodeClass | Object |
| BrowseName | 2, "Signal_N1" |
| DisplayName | "" |
| Description | "" |
| EventNotifier | None |
| WriteMask | 0 |
| UserWriteMask | 0 |

Рис. 4. Модель экземпляра «Светофор Н1» в нотации UaExpert

Крайне важно подчеркнуть системный эффект от применения такой иерархии типов. Система визуализации при чтении адресного пространства сервера автоматически распознает структуру конкретного экземпляра на основе его ссылки на базовый тип. Если в объекте присутствует опциональный узел маневровой команды, на типовой экранной форме диспетчера динамически отрисовывается соответствующий элемент управления; если бы рассматривался простой светофор без маневровых показаний – эти узлы не создавались бы при инстанцировании, и интерфейс автоматически упростился бы.

Это на практике доказывает преодоление семантического разрыва: АРМ ДСП на базе SCADA обретает способность к автоматическому обнаружению функционала и адаптируется под технологическую конфигурацию напольного оборудования без необходимости ручного переписывания графических шаблонов и привязки тегов. Применение единого типизированного подхода позволяет существенно снизить вероятность алгоритмических ошибок при масштабировании систем управления движением поездов.

В традиционных архитектурах ЖАТ, использующих протоколы с плоской адресацией памяти (Modbus, OPC DA), контроллер выступает как пассивный массив неструктурированных данных. Для станции, содержащей

N технологических объектов (стрелок, светофоров, секций и т.д.), каждый из которых характеризуется набором из M параметров контроля и управления, инженеру для настройки АРМ необходимо вручную выполнить операцию привязки каждого отдельного тега к графическому элементу. Алгоритмическая сложность процесса конфигурации такой системы составляет $O(N \times M)$. При масштабировании станции или тиражировании программного обеспечения на другие объекты инфраструктуры трудоемкость растет линейно-мультипликативно, а вероятность внесения ошибок (человеческий фактор) возрастает нелинейно. В такой парадигме подсистема АРМ лишена возможности машинного понимания технологического контекста: для нее управляющий бит перевода стрелки ничем не отличается от бита включения освещения.

Внедрение разработанной предметно-ориентированной информационной модели кардинально меняет парадигму интеграции, наделяя ПЛК функцией семантического самоописания. Использование базовых типов (например, RailwaySwitchType) и механизмов объектного наследования позволяет оптимизировать сложность инжиниринга.

Разработка графического шаблона (типовой экранной формы) для класса объектов выполняется в SCADA-системе однократно, что имеет алгоритмическую сложность $O(1)$. Дальнейшая привязка сводится лишь к указанию корневого узла экземпляра, что снижает общую сложность конфигурации до $O(N)$.

Предложенная архитектура позволяет реализовать концепцию автоматического обнаружения оборудования. Алгоритм взаимодействия клиент-сервер при этом выглядит следующим образом:

SCADA-система при первичном подключении иницирует службу навигации по адресному пространству (сервис Browse).

Выполняется фильтрация узлов по признаку системной ссылки HasTypeDefinition с указанием искомого типа (например, ExitSignalType).

Контроллер возвращает структурированный массив всех выходных светофоров на станции.

Поскольку структура каждого возвращенного экземпляра строго соответствует априори известной информационной модели (включая как обязательные, так и активированные опциональные узлы), подсистема АРМ способна автоматически сгенерировать интерфейсы оператора без ручной переадресации тегов.

Выводы

В ходе проведенного исследования разработана и теоретически обоснована предметно-ориентированная информационная модель объектов железнодорожной автоматики на базе стандарта IEC 62541 (OPC UA). Переход от традиционной плоской адресации переменных к семантической иерархии базовых типов данных (стрелочный перевод, путевая секция,

светофор) позволил решить ряд фундаментальных проблем интеграции микропроцессорных систем централизации:

Повышение функциональной безопасности. Показано, что применение механизма вызова программных процедур (методов) вместо прямой записи управляющих значений в память контроллера формирует дополнительный эшелон защиты. Инкапсуляция логики технологических блокировок посредством динамического управления системным атрибутом разрешения выполнения (Executable) отсекает ошибочные или несанкционированные команды со стороны верхнего уровня непосредственно на границе сетевого стека.

Снижение алгоритмической сложности инжиниринга. Теоретически обосновано, что использование механизмов наследования свойств и машинного самоописания объектов контроллером снижает алгоритмическую сложность настройки подсистемы АРМ с линейно-мультипликативной размерности $O(N \times M)$ до $O(N)$. Это минимизирует влияние человеческого фактора и полностью исключает ошибки перекрестной адресации.

Унификация и масштабируемость конфигураций. На примере модели выходного светофора подтверждена эффективность применения правил опционального моделирования. Разработанный подход позволяет использовать единый базовый шаблон для описания напольного оборудования различной аппаратной комплектации, обеспечивая автоматическую адаптацию типовых экранных форм оператора под конкретный набор функций объекта.

Локализация и стандартизация интерфейсов. Внедрение двухуровневой системы именования узлов разделяет программные идентификаторы и пользовательские интерфейсы, обеспечивая корректную работу скриптов автоматизации независимо от языка отображения мнемосхем.

Таким образом, предложенная архитектура решает проблему семантического разрыва между физическим оборудованием и абстракциями управления движением поездов. Разработанные информационные модели могут служить прототипом отечественной отраслевой спецификации для безопасной и унифицированной интеграции компонентов железнодорожной автоматики от различных производителей.

Список литературы

1. Busboom A. Combining OPC UA with Semantic Web Technologies and AI – State-of-the-Art and Future Research Directions // *Automatisierungstechnik*. 2025. Vol. 73. No. 7. DOI: 10.1515/auto-2024-0158 EDN: YYBUFI
2. Muñoz R., Ripa T. L. BIM-based Digital Twin for the Management of a Railway Station // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2025. Vol. 31. No. 7. P. 747-762. DOI: 10.3846/jcem.2025.24091 EDN: BAVIPU

3. Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains // *European Transport Research Review*. 2024. Vol. 16. Article 58. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5 EDN: TZAYXA

4. Revolutionizing Railway Systems: A Systematic Review of Digital Twin Technologies // *High-speed Railway*. 2025. Vol. 3. No. 3. P. 238-250. DOI: 10.1016/j.hspr.2025.05.005 EDN: WLXZFK

5. Gorelik A.V., Istomin A.V., Kuzmina E.V. Digital Twins and the Harrington Scale in Railway Automation and Telemechanics Reliability Management // *Transportation and Information Technologies in Russia*. 2025. Vol. 15. No. 3. (рус.: Результаты подхода к управлению надежностью через цифровые двойники). DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-379 EDN: TLAFNQ

6. Sintez AT LLC. Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2025. № 4. С. 33-46. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-33-46 EDN: BJMGDY

7. Ефанов Д.В. Технологии цифрового моделирования в железнодорожной отрасли // *Автоматика, связь, информатика*. 2020. № 2. С. 34-38. DOI: 10.34649/AT.2020.2.2.007 EDN: XIGZML

8. Дмитриев В.В., Гаранин М.А. Сквозные цифровые технологии на железнодорожном транспорте // *Автоматика, связь, информатика*. 2025. № 8. DOI: 10.62994/AT.2025.8.8.001 EDN: EQJOCK

9. Ларин А.Н., Ларина И.В. Цифровизация автотранспортной и железнодорожной отраслей как ключевой элемент цифровой экономики // *Известия Транссиба*. 2021. № 4(48). EDN: VWRXTL

References

1. Busboom A. Combining OPC UA with Semantic Web Technologies and AI – State-of-the-Art and Future Research Directions. *Automatisierungstechnik* 2025;73(7). DOI: 10.1515/auto-2024-0158 EDN: YYBUFI.
2. Muñoz R., Ripa T.L. BIM-based Digital Twin for the Management of a Railway Station. *Journal of Civil Engineering and Management* 2025;31(7):747-762. DOI: 10.3846/jcem.2025.24091 EDN: BAVIPU.
3. Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains. *European Transport Research Review* 2024;16:Article 58. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5 EDN: TZAYXA.
4. Revolutionizing Railway Systems: A Systematic Review of Digital Twin Technologies. *High-speed Railway* 2025;3(3):238-250. DOI: 10.1016/j.hspr.2025.05.005 EDN: WLXZFK.
5. Gorelik A.V., Istomin A.V., Kuzmina E.V. Digital Twins and the Harrington Scale in Railway Automation and Telemechanics Reliability Management. *Transportation and Information Technologies in Russia* 2025;15(3). DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-379 EDN: TLAFNQ.

6. Sintez AT LLC. Development of Intelligent Transport Systems: Digital Twins in the Railway Industry. *Intelligent Technologies in Transport* 2025;4:33-46. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-33-46 EDN: BJMGDY.

7. Efanov D.V. Digital Modeling Technologies in the Railway Industry. *Automation, Communication, Informatics* 2020;2:34-38. DOI: 10.34649/AT.2020.2.2.007 EDN: XIGZML.

8. Dmitriev V.V., Garanin M.A. End-to-End Digital Technologies in Railway Transport. *Automation, Communication, Informatics* 2025;8. DOI: 10.62994/AT.2025.8.8.001 EDN: EQJOCK.

9. Larin A.N., Larina I.V. Digitalization of Motor Transport and Railway Industries as a Key Element of the Digital Economy. *Proceedings of Transsib* 2021;4(48). EDN: VWRXTL.

Сведения об авторах

Змиев Тимофей Богданович – магистрант кафедры «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника», ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», 283018, Россия, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Горная, 6, e-mail: timophev37a@gmail.com

Радковский Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника», ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», 283018, Россия, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Горная, 6, e-mail: serj_rsa@mail.ru

Трунаев Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», 344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: andrey.trunayev@mail.ru

About the authors

Timofey A. Zmiyov, Master's Student, Department of Automation, Remote Control, Telecommunications, and Computer Engineering, Donetsk Institute of Railway Transport, 6 Gornaya St., Donetsk, 283018, Russia, Donetsk People's Republic, e-mail: timophev37a@gmail.com

Sergey A. Radkovsky, Candidate of Engineering, Senior Lecturer, Department of Automation, Remote Control, Telecommunications, and Computer Engineering, 6 Gornaya St., Donetsk, 283018, Russia, Donetsk People's Republic, e-mail: serj_rsa@mail.ru

Andrey M. Trunayev, Candidate of Engineering, Senior Lecturer, Department of Railway Signalling, Rostov State Transport University, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia, e-mail: andrey.trunayev@mail.ru

Вклад авторов в статью

Радковский С.А. – постановка задачи исследования, определение методологии объектно-ориентированного проектирования в среде OPC UA, общее научное руководство и редактирование финального текста статьи.

Змиев Т.Б. – Разработка архитектуры адресного пространства и базовых типов данных (RailwaySwitchType, ExitSignalType). Реализация механизма опционального моделирования для светофоров различной комплектации, разработка принципов разделения логики и физических состояний.

Трунаев А.М. – сбор и анализ литературных источников, обзор существующих протоколов обмена данными в системах ЖАТ. Разработка информационной модели путевой секции (RouteSectionType) и алгоритмов безопасного управления через методы. Подготовка аннотации, введения и выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют 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).



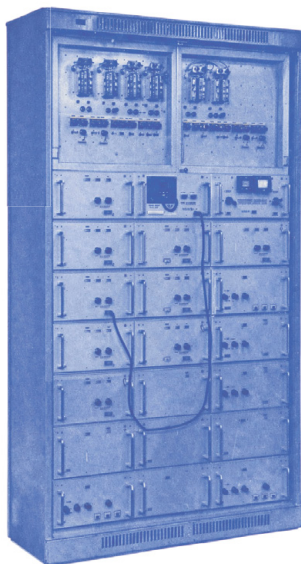
1960

Разработаны и внедрены отечественные системы автоматической локомотивной сигнализации.



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.



1990

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



НИИАС

2026

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

2010

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

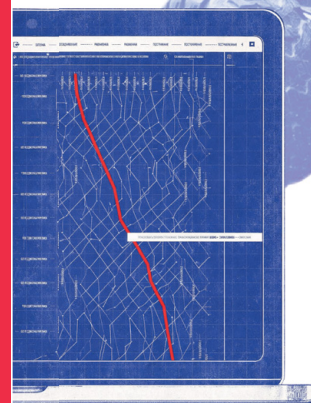


2000

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

2020

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



Структурно-функциональная модель теневого сегмента интернета: сравнительный анализ угроз и методов защиты в контексте развития AI-криминала

The structural and functional model of the shadow segment of the Internet: a comparative analysis of threats and protection methods in the context of the developing AI crime

Аменицкий А.В.* , Воробьев Е.Г.
Amenitsky A.V.* , Vorobyov E.G.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5
Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Russia, 197022, Saint Petersburg, 5 Prof. Popova St.
*E-mail: arbat365@mail.ru



Аменицкий А.В.



Воробьев Е.Г.

Резюме: В статье представлена комплексная структурно-функциональная модель сегментации интернета, выделяющая три отчетливых слоя: Поверхностная сеть (Surface Web), Глубокая сеть (Deep Web) и Теневая сеть (Dark Web). Научная новизна исследования заключается в постановке и решении научной задачи по математической формализации модели, включая структурный анализ с использованием графовых схем и функциональный анализ с определением входных/выходных данных и функций обработки. Предложен многоуровневый фреймворк для оценки киберрисков на стыке технологий искусственного интеллекта (AI) и киберпреступности, с математической моделью расчета рисков. Систематизированы угрозы теневого сегмента и разработана иерархическая модель защитных мер, адаптированная для противодействия AI-усиленным угрозам. Модель формализована как ориентированный граф с функциями агрегации данных и оценки рисков, что позволяет количественно анализировать уязвимости.

Abstract. The article presents a comprehensive structural and functional model of Internet segmentation that identifies three distinct layers: the Surface Web, the Deep Web, and the Dark Web. The scientific novelty lies in the definition and solution of a scientific problem consisting in the mathematical formalisation of the model, including structural analysis using graph schemes and functional analysis with input/output data and processing functions. The authors propose a multi-level framework for assessing cyber risks at the intersection of artificial intelligence technologies (AI) and cybercrime, as well as a mathematical risk calculation model. The threats of the shadow segment are classified, and a hierarchical model of protective measures adapted to counter AI-enhanced threats is developed. The model is formalised as a directed graph with data aggregation and risk assessment functions, enabling quantitative vulnerability analysis.

Ключевые слова: Теневая сеть (Dark Web), Глубокая сеть (Deep Web), анонимность, кибербезопасность, Tor (The Onion Router), оценка рисков, киберпреступность, искусственный интеллект, математическая модель, структурно-функциональный анализ.

Keywords: Dark Web, Deep Web, anonymity, cybersecurity, Tor (The Onion Router), risk assessment, cybercrime, artificial intelligence, mathematical model, structural-functional analysis.

Для цитирования: Аменицкий А.В., Воробьев Е.Г. Структурно-функциональная модель теневого сегмента интернета: сравнительный анализ угроз и методов защиты в контексте развития AI-криминала // Надежность. 2026. №2. С. 68-72. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-68-72>

For citation: Amenitsky A.V., Vorobyov E.G. The structural and functional model of the shadow segment of the Internet: a comparative analysis of threats and protection methods in the context of the developing AI crime. Dependability 2026;2: 68-72. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-68-72>

Поступила: 04.11.2025 / **После доработки:** 04.12.2025 / **К печати:** 25.05.2026
Received on: 04.11.2025 / **Revised on:** 04.12.2025 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Современное информационное пространство интернета характеризуется значительной асимметрией между видимой и скрытой частями. По оценкам, индексируемая поисковыми системами Поверхностная сеть составляет около 5% от общего объема данных, в то время как остальные 95% приходятся на неиндексируемые сегменты – Глубокую и Теневую сеть [1].

Актуальность исследования обусловлена ростом активности киберпреступных группировок в теневом сегменте, где технологии искусственного интеллекта (ИИ) используются для автоматизации атак, анализа уязвимостей и создания адаптивного вредоносного ПО (AI-malware) [2, 5].

Вербальная постановка научной задачи: Научная задача заключается в разработке структурно-функциональной модели теневого сегмента интернета, которая позволит формализовать сегментацию сети, провести сравнительный анализ угроз и методов защиты с учетом влияния ИИ на киберпреступность. Решение задачи включает создание математической модели для оценки рисков, основанной на структурном (графовом) представлении сегментов и функциональных зависимостях между входными данными (угрозы, уязвимости) и выходными (уровни рисков и защитные меры). Это позволит перейти от описательного подхода к количественному анализу, обеспечивая методическое обеспечение для теоретических положений в области кибербезопасности.

Математическая постановка задачи: Пусть интернет представлен как множество сегментов

$$I = \{S, D, T\},$$

где S – Поверхностная сеть; D – Глубокая сеть; T – Теневая сеть. Задача – построить расширенную модель

$$M = (G, F, R),$$

где G – ориентированный граф структуры; F – множество функций обработки данных; R – функция оценки рисков. Решение задачи сводится к минимизации риска R путем оптимизации защитных мер с учетом вероятностных и временных факторов:

$$\min R(T, V, A, P, \Delta t) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot t_i \cdot v_i \cdot (1 + a_i) \cdot e^{\lambda \Delta t},$$

где $T = \{t_1, \dots, t_n\}$ – вектор угроз (нормированный в $[0, 1]$);

$V = \{v_1, \dots, v_n\}$ – вектор уязвимостей;

$A = \{a_1, \dots, a_n\}$ – вектор ИИ-факторов усиления (нормированные в $[0, 1]$);

$P = \{p_1, \dots, p_n\}$ – вектор вероятностей реализации угроз (из $[0, 1]$);

Δt – временной интервал эволюции угроз;

λ – коэффициент экспоненциального роста рисков под влиянием AI (определяется эмпирически, например, $\lambda = 0,05$ для быстрой эволюции).

Ограничения:

$$0 \leq t_i, v_i, a_i, p_i \leq 10, \Delta t \geq 0.$$

Расширение модели включает кластеризацию угроз для группировки подобных рисков, используя алгоритм k -means: минимизация

$$\sum_{k=1}^K \sum_{x \in C_k} \|x - \mu_k\|^2,$$

где C_k – кластеры угроз; μ_k – центроиды. Решение достигается итеративным применением функций (F) для агрегации данных из мониторинга, с использованием статистических методов для оценки p_i (например, на основе исторических данных из теневых форумов).

Цель работы – разработка и математическая верификация модели для оценки рисков и выработки защитных мер.

1. Методология и сравнительный анализ сегментов интернета

Методология основана на системном подходе, включающем структурный и функциональный анализ. Сегменты интернета моделируются как иерархическая структура в виде «айсберга»:

Поверхностная сеть (Surface Web): Индексируемая часть, доступная через публичные поисковые системы (например, Google). Включает социальные сети и открытые ресурсы. Доступ: прямой, без аутентификации.

Глубокая сеть (Deep Web): Неиндексируемый сегмент (основная часть интернета). Включает защищенный контент (базы данных, приватные форумы). Доступ: через аутентификацию, не противозаконный по умолчанию.

Теневая сеть (Dark Web): Подсегмент Deep Web, требующий анонимных протоколов (Tor). Двойственный характер: легитимное использование (правозащита) и криминальное (незаконные рынки) [2, 6].

2. Структурный анализ

Структура представлена ориентированным графом

$$G = (V, E),$$

где вершины

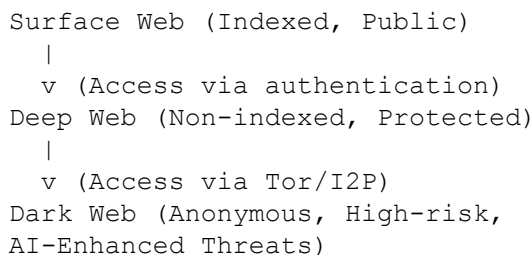
$$V = \{S, D, T\},$$

ребра (E) отражают переходы доступа:

- $S \rightarrow D$: через аутентификацию (вес ребра – уровень защиты паролем);

- $D \rightarrow T$: через анонимные протоколы (вес – уровень анонимности, например, 0,9 для Tor).

Схема графа:



Эта схема иллюстрирует иерархию и зависимости, где каждый уровень добавляет слою сложности доступа.

3. Функциональный анализ

Функции (F) определяют обработку данных:

- Функция сбора данных:

$$f_{collect}(sources) = \bigcup_{s \in sources} data_s,$$

где $sources$ – мониторируемые ресурсы (форумы, рынки).

- Функция обработки:

$$f_{process}(data) = analyze(data),$$

используя алгоритмы (например, линейная регрессия для паттернов угроз).

- Функция анализа:

$$f_{analyze}(processed) = \\ = classify(threats, vulnerabilities, probabilities),$$

с расчетом p_i как

$$p_i = \frac{\text{число инцидентов}_i}{\text{общее число наблюдений}}.$$

Входные данные: векторы угроз из мониторинга (например, частота malware-атак). Выходные: уровни рисков и рекомендации.

4. Архитектура анонимности в сети Tor и анализ уязвимостей

Ключевым элементом доступа к Теневой сети является протокол Tor (The Onion Router), представляющий собой децентрализованную сеть добровольных узлов.

Принцип работы: Маршрутизация трафика через цепочку узлов (входной, промежуточный, выходной) с многослойным шифрованием («луковичная» маршрутизация).

Преимущества: Обеспечение высокого уровня анонимности пользователя.

Недостатки и риски (научная новизна анализа):

- Снижение производительности из-за многократного шифрования/дешифрования.
- Риск скомпрометированных узлов, особенно выходных, после прохождения которых трафик передается в открытом виде.
- Высокий риск заражения malware, проведения фишинговых и сетевых атак ввиду криминогенной природы многих ресурсов.
- Правовые риски, связанные с запретом доступа к таким сетям в ряде юрисдикций.

Tor – децентрализованная сеть с «луковичной» маршрутизацией: трафик проходит через цепочку узлов с шифрованием.

Математическая формализация:

Пусть цепочка узлов $N = \{n_1, n_2, n_3\}$, шифрование – многослойное: $encrypt(m, k_i)$ для каждого n_i .

Уязвимости: вероятность компрометации выходного узла $P(comp) = 0,1$ (по оценкам [3]).

Риск: $R = P(comp) \square Impact$, где $Impact$ – потенциальный ущерб.

5. Фреймворк оценки рисков и предложения по защите (Научная новизна)

На основе проведенного анализа предлагается многоуровневый фреймворк для оценки и снижения рисков, связанных с Теневой сетью, с учетом угроз со стороны AI CyberCrimes:

Уровень 1: Профилактика доступа

Рекомендация: Воздержаться от несанкционированного доступа к Теневой сети в связи с комплексом технических и правовых рисков.

Уровень 2: Технические контрмеры (для санкционированного доступа):

- Использование sandbox-окружения для изоляции браузера Tor и предотвращения распространения malware на основную систему.

- Применение VPN (Virtual Private Network) в дополнение к Tor для создания «двойного» шифрования («принцип пояса и подтяжек»).

- Активация межсетевое экрана (firewall) для мониторинга и контроля входящего и исходящего трафика.

Уровень 3: Проактивный мониторинг и анализ угроз:

- Развитие сотрудничества между правоохранительными органами и исследовательскими центрами (например, IBM X-Force) для постоянного мониторинга тенденций и инструментов атак, обсуждаемых на теневых форумах.

- Использование AI-систем для автоматического анализа данных из открытых и закрытых источников (включая Теневую сеть) с целью прогнозирования и предотвращения кибератак.

Уровень 4: Правовое регулирование:

Анализ пробелов в законодательстве: Необходима гармонизация международного законодательства, регулирующего деятельность в анонимных сетях и преследующего киберпреступления, совершаемые с использованием AI.

Предложение: Разработка международных конвенций, четко разграничивающих правомерное и противоправное использование технологий анонимности и искусственного интеллекта.

Математическая формализация: Риск на уровне (I):

$$R_i = \sum t_i v_i (1 + a_i).$$

Общий риск минимизируется:

$$\min \sum_i R_i$$

под ограничениями ресурсов.

Пример расчета: Для угрозы malware $t = 0,8$, $v = 0,7$, $a = 0,5$:

$$R = 0,8 \times 0,7 \times 1,5 = 0,84.$$

Снижение via VPN: $v' = 0,3$, $R' = 0,36$.

Это решает задачу, предоставляя теоретическую основу для методик защиты

6. Перспективные направления и темы дальнейших научных исследований

Направление 1: Исследование влияния искусственного интеллекта на эволюцию киберпреступности в анонимных сетях (AI-CyberCrimes)

1. Тема: «Разработка методов прогнозирования кибератак на основе анализа активности AI-усиленных ботов в теневого форумах и маркетплейсах».

Актуальность: Криминальные сообщества активно внедряют ИИ для автоматизации взлома, создания адаптивного вредоносного ПО и таргетированного фишинга. Исследование позволит создать проактивную систему защиты.

2. Тема: «Анализ использования генеративных языковых моделей (LLM) для создания дезинформации и ведения психологических операций в теневом сегменте интернета».

Актуальность: Возможность генерации убедительного текстового и медийного контента представляет новую угрозу информационной безопасности государств и корпораций.

3. Тема: «Сравнительный анализ эффективности традиционных и AI-усиленных методов обнаружения и атрибуции киберпреступных групп, оперирующих в сети Tor».

Актуальность: Стандартные методы цифровой криминалистики теряют эффективность против противника, использующего ИИ для маскировки своей деятельности.

Направление 2: Разработка новых архитектур и протоколов для безопасного и регулируемого доступа к анонимным сетям

4. Тема: «Разработка концепции «регулируемой анонимности»: модель протокола с верифицируемым доступом для правоохранительных органов при сохранении конфиденциальности для легитимных пользователей».

Актуальность: Позволит преодолеть классический конфликт между правом на приватность и необходимостью борьбы с преступностью, предложив технологическое решение.

5. Тема: «Исследование устойчивости квантовых компьютеров к криптографическим основам современных анонимных сетей (на примере Tor) и разработка квантово-устойчивых алгоритмов».

Актуальность: Появление квантовых вычислений ставит под угрозу всю существующую криптографию. Необходимо опережающее развитие защищенных протоколов.

Направление 3: Совершенствование методологии оценки рисков и правового регулирования

6. Тема: «Разработка комплексной системы показателей и индикаторов (KPI) для оценки уровня киберугроз, исходящих из теневого сегмента интернета, для различных отраслей экономики».

Актуальность: Позволит организациям количественно оценивать свои риски и более эффективно распределять ресурсы на киберзащиту.

7. Тема: «Сравнительно-правовой анализ национальных и международных правовых режимов, регулирующих деятельность в анонимных сетях, и разработка модельного закона».

Актуальность: Существенный правовой пробел и конфликт юрисдикций затрудняют международное сотрудничество в борьбе с киберпреступностью в Dark Web.

8. Тема: «Исследование социально-психологического портрета и моделей поведения пользователей теневого экономического маркетплейсов».

Актуальность: Понимание мотивации и поведения участников таких платформ необходимо для разработки эффективных стратегий противодействия, выходящих за рамки технических мер.

Направление 4: Разработка проактивных систем защиты на основе ИИ (AI CS)

9. Тема: «Создание самообучающейся системы киберзащиты, интегрирующей данные из открытых, глубоких и теневого сегментов интернета для прогнозирования векторов атак».

Актуальность: Переход от реактивной к проактивной безопасности, когда система предсказывает атаку на основе анализа дискуссий хакеров и утечек данных в Dark Web.

10. Тема: «Разработка методов использования ИИ для симуляции деятельности в анонимных сетях с целью сбора разведывательных данных о киберугрозах (Honeypots следующего поколения)».

Актуальность: Позволит автоматически собирать актуальную информацию о новых инструментах, уязвимостях и целях хакеров, непосредственно из их среды обитания.

Направления дальнейших исследований носят междисциплинарный характер и находятся на стыке компьютерных наук, права, социологии и экономики, что соответствует современным тенденциям в науке.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что Теневая сеть представляет собой сложный социотехнический феномен с двойственным характером использования. Предложенная структурно-функциональная модель и фреймворк оценки рисков позволяют системно подойти к анализу угроз, исходящих из данного сегмента, особенно в контексте их эволюции под влиянием AI. Ключевым направлением дальнейших исследований является разработка адаптивных, AI-усиленных систем киберзащиты, способных противостоять динамично развивающимся угрозам со стороны киберпреступных сообществ, активно использующих как анонимные сети, так и передовые технологии искусственного интеллекта.

Предложенная модель (M) с математической формализацией решает поставленную задачу, обеспечивая структурный и функциональный анализ. Она позволяет количественно оценивать риски и оптимизировать защиты против AI-усиленных угроз, соответствуя требованиям ВАК по научной строгости.

Список литературы

1. Бергман М.К. Белая книга: Глубокая паутина: Обнаружение скрытой ценности. Журнал электронных публикаций. 2001. № 7(1).
2. Чертофф М. Взгляд на теневую сеть с точки зрения государственной политики // Журнал киберполитики. 2017. № 2(1). С. 26-38.
3. Динглдайн Р., Мэтьюсон Н., Сиверсон П. Тор: Он-кон-маршрутизатор второго поколения // Труды 13-го симпозиума USENIX по безопасности. 2004.
4. IBM Security. Отчет о ландшафте облачных угроз X-Force. Публикации IBM Security. 2023.
5. Хусари Г., Аль-Шаэр Э. Динамика рынков даркнета: Подход на основе глубокого обучения для прогнозирования новых киберугроз // Труды конференции ACM SIGSAC по компьютерной и коммуникационной безопасности. 2023.
6. Пастор-Галиндо Х., Дзаго М., Неспולי П. и др. Теневая сеть как платформа для кибертерроризма: Систематический обзор // Компьютеры и безопасность. 2023. № 124. С. 102965.
7. Лопес К., Лазар А., Кизза Дж. М. Квантовая устойчивость в анонимных сетях: Подготовка Тор к постквантовой эре // IEEE Труды по криминалистике и безопасности информации. 2024. № 19. С. 1234-1247.
8. Миттал С., Джоши А. Кибероружие на основе ИИ: Проблемы обнаружения и атрибуции в экосистеме теневой сети // Журнал кибербезопасности. 2023. № 9(1).
9. Европол и УНИКРИ (UNICRI). Использование теневой сети в преступных целях: Оценка угроз 2023. Издательский офис Европейского союза, 2023.
10. Ван З., Лу З. Фреймворк совместного обучения для мониторинга теневой сети без обмена данными // Труды симпозиума IEEE по безопасности и конфиденциальности. 2024.
11. Гилл Л., Сампат Б. Двусторонний меч: Измерение позитивного и негативного влияния теневой сети на общество // Nature Communications. 2023. Vol.14(1). P. 3456.

References

1. Bergman M.K. White Paper: The Deep Web: Surfacing Hidden Value. *Journal of Electronic Publishing* 2001;7(1).
2. Chertoff M. A Public Policy Perspective of the Dark Web. *Journal of Cyber Policy* 2017;2(1):26-38.
3. Dingleline R., Mathewson N., Syverson P. Tor: The Second-Generation Onion Router. In: Proceedings of the 13th USENIX Security Symposium; 2004.
4. IBM Security. X-Force Cloud Threat Landscape Report. IBM Security Publications; 2023.
5. Husari G., Al-Shaer E. Darknet Marketplace Dynamics: A Deep Learning Approach for Predicting Emerging Cyber Threats. In: Proceedings of the ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security; 2023.
6. Pastor-Galindo J., Zago M., Nespoli P. et al. The Dark Web as a Platform for Cyberterrorism: A Systematic Review. *Computers & Security* 2023;124:102965.

7. Lopez C., Lazar A., Kizza J.M. Quantum Resistance in Anonymous Networks: Preparing Tor for the Post-Quantum Era. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 2024;19:1234-1247.

8. Mittal S., Joshi A. AI-Powered Cyberweapons: Detection and Attribution Challenges in the Dark Web Ecosystem. *Journal of Cybersecurity* 2023;9(1):tyad005.

9. Europol & UNICRI. The Use of the Dark Web for Criminal Purposes: A Threat Assessment 2023. Publications Office of the European Union; 2023.

10. Wang Z., Lu Z. A Federated Learning Framework for Collaborative Dark Web Monitoring Without Data Sharing. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy; 2024.

11. Gill L., Sampat B. The Double-Edged Sword: Measuring the Positive and Negative Societal Impact of the Dark Web. *Nature Communications* 2023;14(1):3456.

Сведения об авторах

Аменицкий Алексей Владимирович, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, E-mail: arbat365@mail.ru

Воробьев Евгений Германович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, E-mail: arbat365@internet.ru

About the authors

Alexey V. Amenitsky, Postgraduate Student, Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Russia, 197022, Saint Petersburg, 5 Prof. Popova St., E-mail: arbat365@mail.ru.

Evgeny G. Vorobyov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Russia, 197022, Saint Petersburg, 5 Prof. Popova St., E-mail: arbat365@internet.ru.

Вклад авторов статью

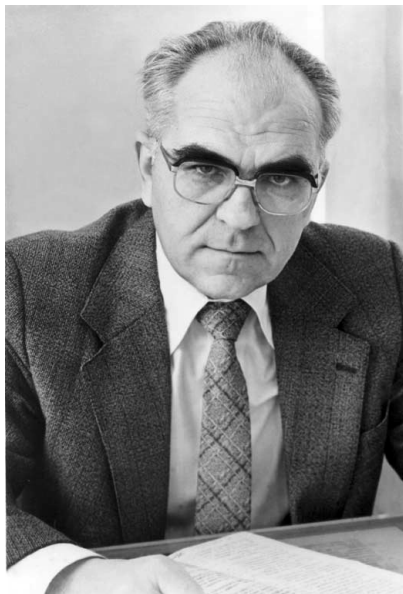
Аменицкий А.В. – разработка структурно-функциональной модели сегментации интернета, математическая формализация модели, включая графовое представление и функции оценки рисков, проведение сравнительного анализа угроз и методов защиты, формулирование перспективных направлений исследований, написание текста статьи.

Воробьев Е.Г. – научное руководство исследованием, постановка научной задачи и целей работы, разработка методологии системного подхода, анализ архитектуры анонимных сетей (Tor) и их уязвимостей, верификация математической модели, редактирование текста статьи, формулирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Руденко Юрий Николаевич (1931–1994)



Аннотация. Статья представляет собой сборник воспоминаний о жизненном и профессиональном пути выдающегося ученого-энергетика, академика Российской академии наук Юрия Николаевича Руденко (1931–1994). Через личные свидетельства его супруги (Ф.В. Руденко), коллег и друзей (Н.И. Воропая, И.А. Ушакова, В.Г. Китушина, М.Г. Сухарева, Е.М. Червонного) раскрывается сложная судьба человека, чье детство и юность пришлись на годы репрессий и Великой Отечественной войны. Описывается его путь от самообразования в тяжелейших условиях до руководства крупнейшими научными институтами (Сибирским энергетическим институтом в Иркутске) и Отделением физико-технических проблем энергетики РАН. Особое внимание уделяется его фундаментальному вкладу в развитие теории надежности энергосистем, созданию Автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ), а также его качествам как талантливого организатора науки, принципиального руководителя и человека редкой порядочности, интеллигентности и обаяния.

1. О жизненном пути

Ф.В. Руденко

По данным биографии Юрия Николаевича Руденко, как и многих его сверстников, на детство и юность которых пали репрессии 1937 года и Великая Отечественная война, – можно написать роман¹.

Родился Юрий Николаевич в маленьком городке Макеевка Сталинской области (Донбасс) 30 августа 1931 года от гражданского брака Конокотина Бориса Владимировича, учителя средней школы по военной подготовке, и Добронравной Элеоноры Леонидовны, учительницы музыки той же школы. Брак распался, когда Юре не было и двух лет.

Вскоре Элеонора Леонидовна выходит замуж за Руденко Николая Михайловича и Юра получает новую фамилию и брата Олега (Руденко Олег Николаевич, родился 29 мая 1929 года, окончил горный техникум и 40 лет отработал на шахте в Джезказгане).

«Счастливым» детство длилось недолго, пришел трагический 37-й год. Отец Николай Михайлович Руденко, работавший начальником сетей и подстанций треста «Донэнерго» в Донбассе, был арестован и сразу расстрелян, как выяснилось из архивных документов после реабилитации. Через несколько месяцев арестовали и

мать Руденко – Элеонору Леонидовну, как жену врага народа, несмотря на ее скромную в то время должность секретаря-машинистки в Доме культуры г. Горловка, и она провела в ссылке восемь лет.

Юру и Олега забрали бабушка и дедушка по матери Добронравные Леонид Трофимович и Аделаида Фердинандовна, которые имели частный дом в г. Феодосии (Крым). Они сыграли огромную роль в воспитании, образовании и становлении характера Юры.

Леонид Трофимович был высокообразованным и культурным человеком. Он преподавал историю и архитектуру в педагогическом техникуме. Сам был неплохим художником, имел картинную галерею, в которой были не только его работы, но и картины известных художников. Несмотря на преклонный возраст – он 1880 года рождения – и ишемическую болезнь сердца его тоже арестовали в 1938 году и осудили на семь лет лишения свободы – за «контрреволюционную пропаганду западного искусства». Юра запомнил, как грузовиками вывозили из дома коллекцию картин, но следов от нее не осталось, ни в каких документах этот факт зафиксирован не был. Оставшиеся книги, эскизы картин и все деревянные пристройки сгорели при бомбежке во время войны.

Дедушка был освобожден всего через год – факт удивительного сострадания к больному человеку, – но в 1941 году скончался. Всю жизнь Юрий Николаевич с теплотой и благодарностью вспоминал его уроки и советы.

Первый класс Юра прошел самостоятельно, вне школы под руководством дедушки, который был строгим и терпеливым учителем. Юра с детства был левшой, но

¹ Фрагменты из книги «Академик Юрий Николаевич Руденко. Воспоминания о жизни и деятельности». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2001. – 295 с.

дедушка научил его работать и правой рукой. В результате всю жизнь Юрий Николаевич одинаково хорошо владел обеими руками – и пером, и топором.

Обнаружив способность к учебе и хорошую память внука (Юра уже в семь лет мог дословно повторить один раз прочитанную страницу), Леонид Трофимович заставлял его много читать и учить наизусть. Впоследствии Юрий покорял сердца девушек, читая наизусть поэмы Лермонтова, лирику Пушкина, Есенина и многих современных поэтов.

Проучившись в школе второй и третий классы, он снова перешел на самообразование. Дедушка умер. Началась война, бабушка с внуками оказались в оккупации.

Знаменитый «Феодосийский десант» совершился у них на глазах, линия сражения проходила прямо через их двор, так как дом одной стеной примыкал к крепости в старом порту. Неоднократная смена позиций немцев и наших моряков, постоянная стрельба, бомбежки, дом разрушен... Сохранившиеся вещи, посуда, книги обменивались на кусок хлеба, любое съестное... Постоянные поиски ночлега в сараях и подвалах...

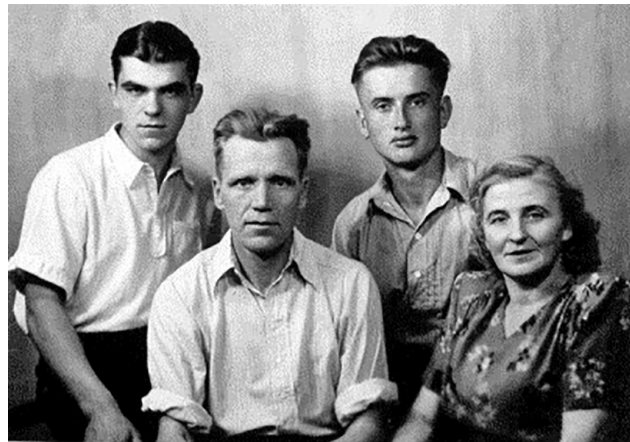
Бабушка умерла в 1944 году, и несколько месяцев братья жили одни. Стреляли из рогатки голубей, ловили раков, спасаться приходилось не только от голода, но и от постоянных бомбежек и обстрелов. Ни о какой школе не было и речи, но тем не менее Юра ухитрялся читать книги, добывая их любыми путями, и вел дневник. Его дневники, сшитые из разных листочков, сохранились.

После освобождения Феодосии, в конце 1944 года братьев забрала сестра бабушки Пенькова Софья Фердинандовна, пережившая свою личную трагедию и оставшаяся одна. Ее мужа расстреляли в 1937 году, 26-летний сын погиб на фронте, а 18-летняя дочь, истощенная голодом, не перенесла воспаления легких. Эта хрупкая, удивительной доброты женщина в свои почти 50 лет взяла на себя заботу о внуках сестры, целиком посвятив оставшуюся жизнь новой семье. Умерла в 1971 году. (По сей день я готовлю по рецептам любимой тети Сони.)

Бабушка привезла Юру и Олега в г. Новотроицк Оренбургской области (тогда – Чкаловской), где обосновались знакомые и родственники мужа, спасаясь от бомбежек, тоже из Крыма. Братьям помогли вырыть землянку. На какие-то, чудом сохранившиеся, вещи сумели выменять козу, разводили кроликов, сажали овощи и картошку.

Только в конце 1945 года вернулась из заключения мать Руденко, Элеонора Леонидовна, с новым мужем Соболев Петром Матвеевичем, который тоже отбывал срок. Два с лишним года землянка была и их домом. Они начали работать, получили двухкомнатную квартиру на пять человек. Постепенно жизнь стала налаживаться.

Несмотря на пережитые годы репрессий и подорванное здоровье, Элеонора Леонидовна и Петр Матвеевич активно включились в трудовую и общественную жизнь, оба были восстановлены в рядах КПСС. П.М. Соболев до пенсии работал на том же Орско-Халиловском металлургическом комбинате (ОХМК), где и Юрий, последние годы освобожденным секретарем партийной организации, дожил до 86 лет.



Э.Л. Руденко с мужем П.М. Соболев и с сыновьями Юрием (слева) и Олегом. Август 1951 года

Мать Ю.Н. Руденко Элеонора Леонидовна (1906–1978) была женщиной властной, обладала прекрасными организаторскими способностями. Из учительницы музыки с домашним образованием она выросла в руководителя народного хора при дворце культуры «Металлург», где исполнялись полностью оперы и оперетты. Она подготовила немало солистов самодеятельности к поступлению в консерваторию, они стали известными певцами в оперных театрах крупных городов страны. До последних дней жизни она поражала всех неутомимостью и трудолюбием. Все эти черты унаследовал Юрий Николаевич, его трудоспособности поражались многие, и умер он практически за рабочим столом.



Ю.Н. и Ф.В. Руденко с детьми Павлом, Петром, Светланой и Сергеем (1982)

Музыку, в основном классическую, Юрий Николаевич очень хорошо знал и любил, имел неплохой голос, но из мальчишеского упрямства не овладел музыкальными инструментами, о чем жалел всю жизнь. Наши четверо детей окончили музыкальную школу по классу фортепьяно, хотя профессиональным музыкантом, к сожалению, не стал никто.

В Новотроицке Юра начал снова учиться сразу в шестом классе, успешно пройдя собеседование за четвертый и пятый. В 1946 году, закончив семилетку, поступил в местный филиал Орского индустриального техникума

ма, который закончил в 1950 году по специальности «Электрооборудование промышленных предприятий». Начал работать по направлению на Орско-Халиловском металлургическом комбинате, где, как упомянуто, после реабилитации работал его отчим.

В том же, 1950 году Юрий Николаевич поступил в Ленинградский заочный индустриальный институт. Закончив институт в мае 1955 года и, сдав вступительные экзамены, тем же летом он был зачислен в аспирантуру Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина.

Кандидатскую диссертацию защитил в марте 1960 года. Несмотря на лестные предложения остаться на кафедре при институте, уехал в Кемерово работать в ОДУ Сибири.

В 1963 году по приглашению академика Л.А. Мелентьева Юрий Николаевич переехал на работу в Сибирский энергетический институт и целиком посвятил себя науке.

Мы с Юрием Николаевичем прожили в браке 32 года, из них 25 лет в Иркутске, там и родились наши три сына и дочь.

Юрий Николаевич был хорошим отцом и мужем, несмотря на свою занятость. Он умел создать вокруг себя атмосферу теплоты и доброжелательности. Безумно любил детей. Был очень требователен к ним, как и к себе, помогал и выручал в любой ситуации, если это не требовало компромисса с совестью. Пережив столько, он был скромен и бережлив в отношении себя, очень аккуратен и чистоплотен.

Наш дом был и остался открытым для друзей, близких и знакомых.

2. Академик Юрий Руденко – ученый и человек¹

Н.И. Воронай

Юрий Николаевич Руденко – академик Российской академии наук, с 1988 по 1994 гг. – академик-секретарь Отделения физико-технических проблем энергетики РАН, до этого 25 лет проработал в Иркутске в Сибирском энергетическом институте (СЭИ) СО АН СССР (сейчас Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН), из них более 15 лет – директором института, выдающийся ученый-энергетик и организатор энергетической науки, лауреат Государственной премии СССР в области науки и техники и премии РАН им. Г.М. Кржижановского, кавалер многих орденов и медалей.

30 августа 2001 г. Юрию Николаевичу исполнилось бы 70 лет. Но жизнь его внезапно оборвалась в ночь на 7 ноября 1994 г. в результате обширного инфаркта.

Он родился в г. Макеевка Донецкой области. Его отец – Б. Конокотин вскоре ушел из семьи и он был усыновлен Н. Руденко. В 1937 г. его приемный отец был репрессирован, а вскоре была арестована и мать, которую

«досрочно освободили» лишь в 1946 г. Так что в предвоенные и военные годы Юрий Николаевич и его сводный брат О. Руденко оказались без родителей и провели этот период в Феодосии у бабушки, которая умерла незадолго до освобождения Крыма, а сами они чудом уцелели.

Юрий Николаевич Руденко – человек своей эпохи, сложной, противоречивой, полной достижений и разочарований, побед и потрясений. Военное детство, тяжелое бремя ответственности не по годам рано сформировали из него взрослого человека, умеющего четко формулировать цели и добиваться результатов в их достижении. Может быть из этих детских по возрасту, но не по окружающей обстановке и жизненным проблемам лет, выросли те четкость и педантичность, самоорганизованность и самодисциплина, которые стали стилем его жизни до самых последних минут. Тяжелые сороковые и пятидесятые, хрущевская оттепель, успехи и застой семидесятых, перестройка, развал СССР и шоковый период в экономике и жизни России – все это Юрий Николаевич пережил, все воспринимал своим сердцем, заинтересованно и неравнодушно, многое – болезненно. Наверно, поэтому сердце в конце концов и не выдержало.

В 1947 г. Ю. Руденко закончил техникум в Орске по специальности «Электрооборудование промпредприятий» и затем до 1956 г. проработал в электроцехе Орско-Халиловского металлургического комбината (от дежурного подстанции до начальника сетевого района). Одновременно с 1950 г. он учится в Ленинградском заочном индустриальном институте, а в 1960 г. заканчивает аспирантуру Ленинградского политехнического института с защитой кандидатской диссертации.

С мая 1960 г. начинается сибирский период в жизни Юрия Николаевича – он работает в Кемерово в объединенном диспетчерском управлении (ОДУ) энергосистемы Западной Сибири. Три с половиной года работы в ОДУ стали для Ю.Н. Руденко прекрасной школой производственной работы в электроэнергетике и обеспечили ему хороший фундамент для всей его последующей научной деятельности.

С декабря 1963 г. по приглашению академика Л. Мелентьева начался 25-летний период работы Юрия Николаевича в иркутском СЭИ. Сначала он заведовал лабораторией электроэнергетики и энергетических систем, с мая 1965 г. был зам. директора, а с апреля 1973 г. и по август 1988 г. – директором института. Именно в СЭИ произошло становление его как выдающегося ученого-энергетика с мировым именем, крупного организатора науки и общественного деятеля.

Как ученый, Юрий Николаевич очень остро чувствовал актуальные проблемы, по его инициативе организовывались «мозговые штурмы» с целью формирования задела, «прорыва» по той или иной проблеме. В конце 1960-х – начале 1970-х одной из таких проблем была концепция создания Автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) Единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) СССР. Это было на самом деле очень актуально в то время: только что

¹ Оригинал статьи см. <http://www-sbras.nsc.ru/HBC/2001/n32-33/f07.html>

(в середине 1960-х) завершилось формирование ЕЭЭС подключением Объединенной ЭЭС Сибири к остальной части ЕЭЭС, активно начало функционировать Центральное диспетчерское управление ЕЭЭС СССР, начали внедряться ЭВМ для решения задач диспетчерского управления. Была организована инициативная бригада из ведущих электроэнергетиков института, работой которой руководил Ю. Руденко. Результатом была логично изложенная концепция иерархической АСДУ ЕЭЭС СССР, опубликованная в серии статей в журнале «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт» в 1969 г.

Концепция АСДУ была комплексным трудом, ярким примером системного подхода, в котором СЭИ был уже признанным лидером, и рассматривала все уровни иерархии диспетчерского управления в территориальном, временном и ситуативном аспектах. Конечно, многие тогдашние представления потом пересматривались – жизнь вносила свои коррективы, но дело было начато. Логический итог – присуждение в 1986 году коллективу под руководством Юрия Николаевича Государственной премии СССР в области науки и техники – за комплекс работ по теоретическим основам и реализации АСДУ ЭЭС.

Другой такой крупной проблемой стала разработка в конце 1970-х годов по инициативе Л. Мелентьева Энергетической программы СССР на длительную перспективу. Юрий Николаевич тогда отвечал за электроэнергетический блок. Несмотря на удаленность Иркутска, он организовал эффективную работу коллектива, состоящего из специалистов разных организаций, в том числе из СЭИ.

Эти качества Юрия Николаевича как ученого и организатора науки – раньше других «замечать» актуальную проблему и организовать «прорыв» на ее «фронте» – проявились отчетливо и в других случаях. Может быть, одним из наиболее ярких оказалась постановка межотраслевой проблемы надежности систем энергетики, вылившаяся в научный семинар «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», организованный Юрием Николаевичем в 1973 г., который единственный в России продолжал функционировать даже в самые тяжелые годы и продолжает успешно работать до сих пор. Правда, когда в 90-е годы стало ясно, что финансовые проблемы становятся камнем преткновения, произошел срыв одного из семинаров в 1994 году, в Нововоронеже – тогда буквально за неделю до его начала посыпались массовые телеграммы от участников о невозможности приехать. Юрий Николаевич очень переживал этот срыв.

Большинство научных идей Юрия Николаевича, которые реализовывались им и его учениками, были оригинальными. Но были и уникальные случаи. Одна из таких идей теоретического, чисто математического плана – совершенно оригинальный подход к использованию метода функций Ляпунова для оценки устойчивости динамических систем при множестве следующих друг за другом возмущений. Для электроэнергетических систем такая постановка очень актуальна. И это при том, что Юрий Николаевич не был математиком по об-

разованию. Но идея была представлена математически исключительно корректно.

С именем Ю. Руденко много связано в Иркутске и области. В 1970-е годы он был инициатором создания НПО «Энергия», сплотившего энергетиков области на решение актуальных практических задач, много лет возглавлял областной межведомственный координационный совет по внедрению вычислительной техники в народное хозяйство. Был инициатором принципиально новой в те годы формы подготовки специалистов – учебно-научно-производственного комплекса (УНПК) Иркутского политехнического института (ИПИ) и СЭИ. Тогда, в 1978 г., эта форма была новой и, более того, приказ-постановление Минвуза РСФСР и Сибирского отделения АН СССР об организации УНПК ИПИ-СЭИ был первым (а возможно, остался вообще единственным).

Юрий Николаевич большое значение придавал развитию энергетических исследований в Сибирском отделении АН СССР. Он был инициатором создания в Тюменском научном центре «выносного» отдела энергетики на базе СЭИ, оказывал постоянное внимание и поддержку развитию коллектива энергетиков в Институте физико-технических проблем Севера Якутского научного центра СО АН СССР.

Еще одна сторона личности Юрия Николаевича связана с его зарубежной научной активностью. Он долгое время был членом СИГРЭ (одна из известнейших и авторитетнейших научных организаций мира), был знаком со многими крупными западными учеными и специалистами, видел, что на Западе не знают и не ценят нашу науку, и глубоко переживал эту ситуацию. Этим, собственно, было продиктовано его стремление организовать ряд международных семинаров по надежности систем энергетики, в том числе три российско-германских семинара совместно с профессором Хаубрихом, директором Института электроустановок и энергохозяйства технического университета Аахена, и четыре семинара по межгосударственным энергообъединениям и мировой энергосистеме совместно с академиком АН Венгрии Капойи.

В этом же ряду стоит организация международной энергетической исследовательской лаборатории в Будапеште при спонсорской поддержке академика Капойи. Первым директором этой лаборатории был Ю. Кучеров, заведующий лабораторией СЭИ, сейчас он начальник Департамента научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России». После Ю. Кучерова международную лабораторию возглавлял Д. Ефимов, также сотрудник СЭИ.

Вспоминается страстное выступление Ю. Руденко на одном из заседаний диссертационного совета СЭИ в конце 80-х годов. Лейтмотивом его был призыв: пишите статьи в зарубежные журналы, выступайте с докладами на международных конференциях, активно сотрудничайте с зарубежными учеными. Юрий Николаевич видел, что отношение к науке в стране коренным образом меняется в худшую сторону, и только международное признание, международная активность могут как-то поддержать коллектив института, не позволяя растерять наработанный потенциал

и кадры в условиях растущей невостребованности науки в стране. Время показало, что он был абсолютно прав: сегодняшние позиции института во многом определяются тем, что нас знают и высоко оценивают за рубежом.

Самого Юрия Николаевича как ученого очень высоко оценивали все зарубежные специалисты, кто с ним общался. Поражала широта и одновременно глубина его научных интересов, системность научного мышления, отсутствием которого страдают многие наши зарубежные коллеги, да и российские тоже.

В 1988 году Юрия Николаевича избирают академиком-секретарем Отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР, и в августе того же года он переезжает в Москву. Начинается московский период его жизни продолжительностью чуть более шести лет – до 7 ноября 1994 года, дня его неожиданной кончины.

То, что Юрия Николаевича члены ОФТПЭ избрали академиком-секретарем отделения, мне кажется закономерным. Именно он, человек с системными и разносторонними знаниями в области энергетики, оказался на месте и сумел существенно интегрировать различные направления ОФТПЭ – теплофизику, электрофизику, ядерную энергетику и ряд других. Излишне говорить, что со своими исключительными организаторскими способностями он также оказался на месте.

Юрий Николаевич в начале 1990-х годов предпринял активные усилия по налаживанию конструктивных контактов ОФТПЭ РАН с Минтопэнерго РФ, РАО «ЕЭС России», РАО «Газпром», Советом безопасности РФ, Международной топливно-энергетической ассоциацией, по расширению международных связей. Одновременно он продолжал и активную научную работу, а также руководил научными советами, семинарами и т.д.

Большой заслугой Ю. Руденко в этот период его жизни является формирование новых направлений системных исследований в энергетике с учетом изменившихся условий и требований. Это относится прежде всего к таким проблемам, как создание межнациональных и глобальных энергетических систем, энергетическая безопасность России и ее регионов, научно-организационное обеспечение разработок и сопровождения энергетических стратегий и программ различного уровня.

Юрий Николаевич остро переживал потерю позиций российской энергетики в результате перестройки, а затем экономического кризиса после распада СССР. Он отчетливо понимал, что в рыночных условиях западные энергокомпании будут отводить нашей стране роль сырьевого придатка.

Могу с уверенностью сказать, что в целом Юрий Николаевич одобрял идеи перестройки и те тенденции либерализации экономики и общества, которые развивались с конца 1980-х годов. В то же время он глубоко переживал распад СССР и последующие экономические и социально-политические катаклизмы в России, начиная с 1992 года.

Юрий Николаевич не воспринимал и принципиально не принимал многие решения начала 90-х годов, такие, например, как акционирование и ваучерная приватиза-

ция. Как специалист-энергетик, он глубоко понимал, что эти процессы ведут к раздроблению целенной организованной энергетики, к потере ею системных свойств и в конечном счете – к существенному снижению эффективности и надежности энергоснабжения потребителей. Особенно его раздражало и выводило из себя то, что все эти преобразования делались наскоком, без серьезных и глубоких исследований тех последствий, к которым они могут привести. С этой точки зрения он положительно оценивал создание РАО «ЕЭС России» как попытку сохранить в каком-то виде технологически и технически единую энергосистему страны, но в то же время критиковал поспешность и недостаточную продуманность тех шагов. Хотя Юрий Николаевич, конечно, отчетливо понимал, что спешить нужно было, иначе центробежные тенденции могли бы привести к раздроблению электроэнергетики.

Юрию Николаевичу, человеку глубоко порядочному и честному, было невозможно принять те новые для нашего общества «ценности», которые начали развиваться в 90-е годы. Для него было непонятно, как человек может говорить одно, а делать – совершенно противоположное, публично объяснять свое поведение какими-то высокими идеями, в то время как подоплека его действий лежит на поверхности и она кардинально отличается от словесной трактовки, и эти действия явно непорядочны.

Драматизм ситуации для Юрия Николаевича в последние годы его жизни, мне кажется, как раз и заключался в том, что весь его жизненный опыт, сложившееся цельное мировоззрение в широком смысле, жизненная позиция, вошли в противоречие с реальной действительностью начала 90-х годов. Я совсем не хочу сказать, что Юрий Николаевич не знал теневых сторон бывшей партийно-номенклатурной системы или отмахивался от них. Совсем нет, но тогда он видел, как ему казалось, какие-то возможности, рычаги борьбы с такими теневыми сторонами и, прежде всего, личным примером. В этом, конечно, проявлялся определенный романтизм Юрия Николаевича, его уверенность, что в целом система правильная, и хотя в ней есть отрицательные моменты, но они устранимы.

Все, кто работал с Юрием Николаевичем Руденко, попадали под обаяние личности этого человека, его системного мышления, огромной работоспособности, высочайшей ответственности и обязательности, и в то же время – мягкости и интеллигентности в общении, сочетавшихся с твердостью в отстаивании принципиальных позиций.

3. А для звезды, что сорвалась и падает...

И.А. Ушаков

Первая встреча. Говорят, что с годами все труднее найти настоящего друга. Но вот мне посчастливилось встретиться и подружиться с Юрием Николаевичем Руденко, когда каждому из нас было уже далеко за со-

рок... И он стал для меня лучшим другом – преданным, искренним, интеллигентным... Тем более трагичен для меня был его преждевременный уход...

Мне хотелось бы поделиться своими воспоминаниями об этом замечательном человеке, который для многих был образцом неповторимой честности, нестигаемой принципиальности и самоотверженного труда. Мне не хочется вовсе превратить эти воспоминания в оценку его профессиональных достижений и его вклада в развитие советской энергетики. Я хотел бы вспомнить несколько ситуаций, которые показывали бы его с «человеческой» стороны, если хотите, в его повседневной, а не только профессиональной жизни.

Впервые я услышал о Ю.Н. в Болгарии от одного из его ближайших друзей – профессора Петера Тошева, с которым они учились вместе еще в институте в Ленинграде. Тот дал мне адрес Ю.Н. и сказал, чтобы я непременно с ним связался, так как может оказаться, что это будет интересно и полезно для нас обоих. И он оказался прав. Вернувшись из Софии, я сразу же послал письмо Ю.Н., ответ от которого получил немедленно. (Те, кто его знал, помнят, что Ю.Н. был весьма пунктуален.) Вскоре он приехал в командировку в Москву, позвонил мне вечером домой и мы договорились о встрече на следующий день у меня дома в 8:30 утра. Однако в 7 утра меня сдернул с постели звонок из секретариата директора моего института (работал я в одном из предприятий военно-промышленного комплекса): меня срочно вызывали по поводу каких-то проблем на испытаниях аппаратуры. Не проснувшись как следует, второпях одевшись, я помчался на работу и... начисто забыл о встрече с Ю.Н.!



Ю.Н. Руденко и И.А. Ушаков (слева)

Пришел я домой уже после восьми вечера и мне домашние сообщили, что ровно в 8:30 пришел Ю.Н., был явно обескуражен моим отсутствием и, оставив записочку со своим телефоном, ушел. Вы понимаете, как он

– всегда предельно точный и даже чрезмерно аккуратный по части встреч – отреагировал на мое разгильдяйство. Ведь мог хотя бы домашних попросить извиниться за мое отсутствие из-за неожиданного вызова на работы!

Итак, начало наших отношений складывалось хуже некуда. Я тут же бросился звонить ему по оставленному телефону, встретил холодный и достаточно жесткий голос, сожалеющий, что мы не сможем встретиться, поскольку завтра утром он улетает в Иркутск. На улице лил проливной дождь... Стоя у окна во время разговора, я видел, что на улице напротив моих окон на стоянке такси стояло две машины. Я сказал, что не все еще потеряно и я буду у него через 20 минут. Он хмыкнул, дал мне адрес и сказал, что хорошо будет, если я приеду через час: он сам ехал ко мне на такси минут 30. Я рванул к двери (азарт проснулся), без зонта, мокрющий влетел в такси и сказа шоферу, чтобы он мчал во всю прыть, за скорость – трешку сверху. Мы мчались, не глядя на светофоры, которые мутными пятнами светились вдаль – «дворники» едва успевали сметать бурные потоки дождя... Благо, что в такую погоду любителей кататься на машинах и ходить по улицам почти не было. Мы домчались меньше, чем за 20 минут...

Это несколько исправило мою репутацию в глазах Ю.Н., хотя «отрабатывать» потом пришлось долго! Поговорили, чуток выпили, потом попили и чайку... Между нами как-то сразу установился необычный душевный контакт. (В таких случаях, о подобных встречах с особями противоположного пола говорят о любви с первого взгляда.) Начало дружбе было положено.

Он пригласил меня на свой семинар на остров Ольхон. Я с удовольствием согласился: давно мечтал хоть одним глазком взглянуть на Байкал.

Семинар на Ольхоне. Получил приглашение от Ю.Н.: лечу на свой первый семинар в Иркутске, да еще на Байкале! Спросил про погоду, про форму одежды. Первая – отличная, вторая – произвольная... Так и решил: лечу с рюкзаком, в ковбойке и джинсах, на всякий случай – свитерок (ведь все же Сибирь, что ни говори!).

Прилетел. Схожу с самолета. «Ваши документики!» Ну, не спеша снял рюкзак, порылся в нем, достал паспорт. «По какому делу?» – «Да вот, товарищ, еду к другу, директору СЭИ...». Чувствую, что переборщил слегка с одежкой... Можно было бы и пиджачок нацепить – вон приличную же публику не шмонают! Смотрю, вот-вот с милых милицейских уст сорвется знакомое: «Тамбовский волк тебе товарищ!»

Тут вдруг из вечной аэропортовской толчи возникает Ю.Н., показывает свое удостоверение и берет меня «на поруки». Я спрашиваю (но очень-очень миролюбиво – ведь власти не любят качающих права): «А в чем дело-то?» – «Да вот убег тут уголовничек один, рецидивист. По описанию шибко на вас смахивает...». Повеселились мы потом с Ю.Н.!

Пужинали у него дома, чем Бог послал. (А посылал тогда бог в Сибири не густо: что-то не любил старикашка этого прекрасного края... А вот то, что шло помимо бога,



«Конференц-зал» (семинар на Ольхоне)

через обком, тем Ю.Н. принципиально не пользовался, чем вызывал неудовольствие власть предержащих: кто же любит белых ворон!).

Рано утром поехали в Листвянку, а оттуда на институтском «крейсере» на остров Ольхон. Там уже разбит палаточный лагерь, и «конференц-зал» – тент, под которым размещались, прячась от жаркого летнего сибирского солнца, «конферененты».

Уже на утро, на первом же заседании, произошел интересный эпизод. Конечно, главной фигурой этого эпизода был Ю.Н. Выступал один начинающий быть известным специалистом в области надежности в энергетике человек. Фамилию не забыл, но зачем вам она, а? Так вот, сообщает он нам о расчете резервированных трубопроводных систем. Понесло его немного «не в ту степь». Закончил. Стоит чуть ли не в смокинге, подвязан «галстухом». Млеет от жары, но горд. Вопросы. Я замечаю ему: «А вот та формула у Вас неверна...». – «Как не верна? Эта формула взята из Справочника по надежности Ушакова!». – «Ну, и у Ушакова бывают ошибки... Главное, что эта формула применена у вас неправильно...». – «Что вы мне тут говорите! Я уже три года занимаюсь проблемой надежности!». В этот самый момент Ю.Н., пряча, как всегда, улыбку в усах (которых у него отродясь не было), говорит: «Успокойтесь, Аристарх Евлампиевич (допустим так звали того будущего специалиста). Обсудите этот вопрос после заседания в



Столовая (семинар на Слюдяных озерах)

рабочем порядке с профессором Ушаковым...» – и сделал жест рукой, как бы представляя меня. Зал (если так можно назвать пространство под навесом), грохнул от смеха. Но Аристарх был молодец, заржал и сам.

Вот так Ю.Н. свел на нет ситуацию, которая могла дойти до «интеллектуального мордобоя»... Вообще нужно сказать, что уметь быть серьезным председателем конференции и внезапно находить эффектные и в то же время эффективные ходы было отличительным свойством Ю.Н. При этом он все делал так, что человеческое достоинство ни одной из сторон никогда не было затронуто.

Круиз по Байкалу. Однажды утром, еще до шести (по Москве), раздается звонок. Звонит из Иркутска секретарь Ю.Н. и милым голоском сообщает мне, что завтра утром из Листвянки отходит институтский «Титаник», отправляющийся в кругобайкальское путешествие в честь юбилея Ю.Н. Руденко, и я имею место быть приглашенным гостем, не забыл ли, мол. Я спросонья никак не могу понять: как завтра утром? А как же с билетом? А как успеть оформить отпуск? Это же невозможно! Но, если уж очень хочется, то все возможно! (И как же я упустил: мне обо всем уже было сказано давным-давно!)

Одним словом, успел вылететь в тот же день, правда билеты доставал через знакомых в ... впрочем, этом не важно, где... Но на безрыбье и сам рыбой станешь!..

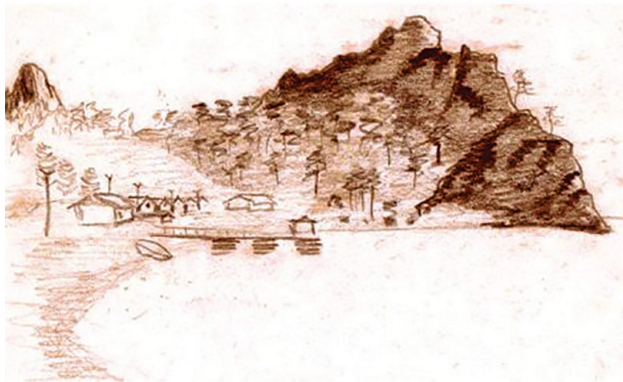


Одна из немногих минуток отдыха (семинар на Слюдяных озерах): Руденко, Зиночка и Слава (Ушаков-младший)

Прилетел, переночевал в гостеприимном доме Руденко, а наутро – в путь! Путешествие было преинтереснейшим во всех смыслах. Увидеть Байкал весь – вот так «от души» – стало моей мечтой после первой с ним встречи. И мечта эта, наконец-то, сбылась! Мы пробо-родили Байкал с юга на север по западной его стороне, а вернулись назад по восточной.

Именинник был душой общества, а мы с Алексеем Макаровым были «отдушинами». Дело в том, что Ю.Н. собрал в основном своих старинных друзей, с которыми он учился в институте в Ленинграде. Все его очень любили, но каждому казалось, что именно ему уделяется мало внимания, хотя Ю.Н. только тем и занимался, что

«обслуживал» друзей. Среди друзей (и не только среди прекрасной половины человечества!) начались буквально сцены ревности. Нужно было спасать положение. Мы с Алексеем начали «отвлекающую психотерапию»: выпускали «корабельную» стенгазету, устраивали концерты самодеятельности, спортивные соревнования, конкурсы народно-туристской песни у костра, на борту создали «кактусерий» из представителей прибайкальской флоры, и т.п. Конечно во всех этих «общественных мероприятиях» Ю.Н. участвовал активнейшим образом.



Бухточка на Байкале (рисунок И.А. Ушакова)

Этот поход был и очень полезен: мы обсудили массу деловых проблем. (Ведь Ю.Н., вообще-то говоря, не умел отдыхать!)

Живучесть: живу-честь, живуч-есть, жив – учесь! Я начал с каламбура Ю.Б. Гука, изобретенного им на одном из семинаров, посвященных именно проблеме живучести энергосистем. Но это будет много позже. А начиналось все следующим образом.

Однажды после очередного семинара, который проходил в «Интуристе» на берегу Байкала при устье Ангары, мы с Ю.Н. остались вдвоем на пару дней. Он сказал мне, что есть одна идея, о которой нужно поговорить.

Стояли удивительно солнечные мартовские деньки. Мы ходили, жмурясь от солнышка, по двухметровой толще прозрачайшего байкальского льда. Если приглядеться, то можно было увидеть даже темные силуэты рыб, лениво проплывавшие под ногами, водоросли... Особенно хорошо было видно, если лечь на лед, очистить его от снежной пороши и посмотреть, как смотрят днем в окно избы, прикрываясь руками от внешнего света.

Разговор пошел о живучести систем энергетики, т.е. их способности противостоять «недружественным» преднамеренным воздействиям. Понятно, что супостат не будет громить что угодно, а всегда будет выбирать наиболее уязвимые точки, «узкие места» в системе. Какой должна быть структура системы, чтобы успешно противостоять самым опасным отказам? Такого рода постановок задач в тогдашней теории надежности на то время не было. За общим разговором последовали часы обсуждений, формулировок задач, подготовки плана и разработки «стратегии и тактики» вовлечения заказчиков.

Спустя какое-то время, мы с Ю.Н. в Москве поехали на встречу к некоему важному чиновнику на прием. Идея-таки овладела массами! (А масса у того чиновника была немалая.) «Генерал» (будем так условно называть чиновника) спросил нас: «Знаете ли вы, что надо делать в случае нанесения по стране ядерного удара?» Это было так похоже на начало популярного в то время анекдота, что мы с Ю.Н. невольно хмыкнули. (Кто знает, может, «Генерал» – весельчак?) «Генерал» вопросительно взглянул на нас. Тут меня дернул черт за язык и я продолжил тот известный анекдот до конца: «Надо завернуться в белый саван и без паники ползти на кладбище...» Немая сцена из «Ревизора» в исполнении лучших МХАТовских классиков не пошла бы ни в какое сравнение с тем, что случилось тогда! Благо, опять, как всегда, положение спас Ю.Н. Он сказал что-то типа: «Анекдоты – анекдотами, но мы, кажется, действительно немножко представляем, что надо делать в такой ситуации».

Получилось, что мы с «Генералом» разыграли перед Руденко анекдотец, дав ему в руки инициативу. Конечно же, заявление Ю.Н. было некоторым преувеличением (в случае массивного удара противника анекдот оставался в силе), но в результате заказ для института был получен.

Проблема действительно была не только важная, но и интересная, хотя, нужно заметить, что «централизация и живучесть – две вещи несовместные», как сказал бы Пушкин на нашем месте.

Написание книги. Уж не помню, когда и как возникла идея написать книгу по надежности в энергетике. Конечно, многое было предопределено семинарами СЭИ по надежности энергосистем: нужна была хотя бы общая терминология, какие-то унифицированные методы расчета надежности, акцентирование на специфических сторонах систем энергетики.

Поначалу писалось легко: каждый дудел в свою дуду, не думая о партнере. (Хотя план всей книги, конечно же, был.) А вот «сшивание» рукописи, редактирование, стыковка глав давались трудно, несмотря на то, что у нас никаких принципиальных разногласий не было. Очень сочувствовали мы тогда Ильфу и Петрову, Ландау и Лифшицу, Карцеву и Ильченко...

В основном вместе мы работали, когда Ю.Н. приезжал в командировку в Москву. Появлялся он у нас в доме замотанный, голодный не раньше семи-восьми вечера. Все предложения насчет ужина категорически отвергал. Мы сидели в моем кабинете часов до десяти, после чего я, ссылаясь на головную боль (на чем-то нужно было сыграть!), говорил, что пора бы перекусить... Вконец измученный Ю.Н. наконец-то соглашался...

В период написания книги, когда я приезжал в Иркутск, мы иногда на субботу-воскресенье уезжали на его дачу. Вообще-то Ю.Н. старался проводить как можно больше свободного времени, но как мало его у него было... Гораздо больше мы занимались книгой во время семинаров вечерами, после заседаний. Ох, сколько чудесных байкальских вечеров испортил мне Ю.Н.!

Книга наконец вышла в формате «роман-газеты» – в мягкой обложке, нелепо большая и нелепого голубого цвета... Читать ее можно было, только сидя за большим письменным (на худой конец, обеденным) столом. Хорошая ли получилась книжка, не мне судить. Во всяком случае, подобной до того не было. (Хотя это, возможно, аргумент больше против, чем за.) Ее даже собиралось переводить на английский одно нью-йоркское издательство, но умудрилось еще до заключения договора обанкротиться, так что не мы были тому виной...



Дача Руденко (рисунок И.А. Ушакова)

Книга эта попала на глаза Б.В. Гнеденко, которому понравилась некоторыми совершенно новыми постановками задач. Мы с Ю.Н. встречались с ним в его квартире в главном здании МГУ. Разговор был неспешный, обстоятельный, с чаепитием под Моцарта и домашние печения... Б.В. дал много советов, указал на некоторые математические неточности. Он порекомендовал нам поработать над вторым изданием. Через три года, в 1989 г. книгу переиздало Сибирское Отделение. Книга получилась более солидной (хотя бы внешне). Мы показали ее в окончательном варианте Борису Владимировичу, он дал нам еще несколько советов и, по нашей просьбе, согласился быть титульным редактором.

Когда я уже преподавал в Университете Джорджа Вашингтона, Ю.Н. сообщил, что будет на каком-то совещании в Америке и прилетит в Вашингтон на один вечер. Естественно, что не заехать к нам он не мог, а к тому же, как он сказал, у него была интересная новость. Прилетел он в Вашингтон. Мы забираем его из гостиницы, привозим к нам домой. Перед ужином Ю.Н. достает нечто завернутое в бумагу, размером с пол обеденного стола, разворачивает и вручает мне громадную папку: «Ну, поздравляю, получили мы с тобой премию им. Кржижановского за монографию «Надежность систем энергетики»! И премия нам положена огромная, как хорошая Государственная – 50 тысяч рублей! Так что при нынешнем курсе рубля причитается каждому из нас по восемь долларов и 40 центов!»

Все комментарии по этому поводу я пропускаю, можете не закрывать глаза и не затыкать уши...

Вместо заключения. Были ли соизмеримые или даже лучшие организаторы науки в СЭИ? Пожалуй, были... Были ли соизмеримые и даже лучшие специалисты в области энергетики в СЭИ? Да, пожалуй, тоже были (хотя, возможно, по диапазону и уже)... Но чем же тогда брал Руденко? На мой взгляд, тем, что это был руководитель и специалист с удивительно обаятельной человеческой личностью. В этом смысле, он был уникален. Посудите сами. Целеустремленный и даже порой жестковатый руководитель и, в то же время, деликатный и предельно отзывчивый к чужим бедам и трудностям... Высокопрофессиональный специалист, который при общении никогда ни перед кем не показывал своего профессионального превосходства... В среднем довольно скупой и даже суховатый в общении, взрывающийся иногда неожиданными блестящими юмором и остроумием...



Ю.Н. Руденко и И.А. Ушаков (справа) на борту институтского пароходика

Человек он был предельно честный, принципиальный, бесребреник. Порой он выглядел даже неким Дон Кихотом, кои практически вымерли нынче на Руси... Мне кажется, что избрание его академиком-секретарем Отделения Энергетики Академии Наук было для него роковым... Нельзя Антеям отрываться от земли-матушки! Но долг есть долг, а Юрий Николаевич был всегда человеком долга прежде всего.

4. Печать доброго чувства навсегда¹

В.Г. Китущин

Судьба сводит нас с людьми, которых вольно или невольно с кем-то сравниваешь, порою даже особо не задумываясь о критериях этого сравнения. Встреча с Юрием Николаевичем как-то сразу нарушила эту схему. Это началось уже с первого знакомства на симпозиуме в Иркутске, в новом, только что построенном здании СЭИ. Взгляд, увлекающая глубина глаз, стремительность,

¹ Из книги «Академик Юрий Николаевич Руденко. Воспоминания о жизни и деятельности». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2001. – 295 с.

убежденность, четкость – все это харизматически подчиняло, влекло, а он показывал свои владения – электродинамическую модель, рассказывал о планах...

Дальнейшее знакомство все больше сближало с ним и раскрывало все новые и новые грани этого удивительного человека. Получалось как-то естественно, что он мог занять позицию наставника (например, как оппонент, консультант по моим диссертациям), позицию начальника и поручать какие-то дела (хотя я никогда не был у него в подчинении по службе), друга (провести душевные беседы за чаркой) и друга семьи (желанный гость дома в любое время). И это все происходило, воспринималось как само собой разумеющееся.

Естественным получалось и то, что, оказываясь в Иркутске (или потом – в Москве), попадаешь в душевную атмосферу его семьи, созданную заботами Инны Вячеславовны.

И вот теперь, вглядываясь издали в этого человека, даешься диву, только перечисляя те качества, которыми он был одарен и по которым недосыгаемо возвышался над окружающими.

Думаю, тема «Юрий Николаевич Руденко» безгранична и достойна более талантливых перьев, чем перья «технарей», привыкших все анализировать, моделировать и рассчитывать. Но в одном можно быть убежденным: у каждого, кто повстречал этого человека, печать яркого, доброго, невозвратно щемящего чувства навсегда осталась в душе.

5. Образец руководителя научных форумов¹

М.Г. Сухарев

У меня дома на рабочем столе под стеклом лежит фотография Юрия Николаевича Руденко. Черные брови, серые, почти седые волосы, сжатые, прямые губы, взгляд на меня. Не знаю, когда и где сделан снимок, но думаю, что на одном из последних семинаров, который прошел под его руководством. Я встречался с Юрием Николаевичем и на комиссиях разного ранга, и в домашней обстановке, но чаще всего на заседаниях семинара по надежности. Поэтому, когда думаю о нем, память чаще всего подбрасывает сцены семинарской жизни.

Память удерживает немного. Открываю двенадцатый выпуск трудов семинара «Экономико-математические модели для исследования надежности систем энергетики», чтобы вспомнить дату. Написано: в сентябре 1976 года в г. Фрунзе состоялось двадцать первое заседание постоянно действующего научного семинара... Это было 2-е заседание, на котором я присутствовал, и 1-е, которое при мне вел Юрий Николаевич. Предыдущее, в Новосибирске, прошло без его участия. Видно в мире произошли какие-то неординарные события, которые

ему помешали приехать. Других случаев отсутствия не припомню. Уже будучи на высокой административной должности в Академии наук, он всегда находил время, чтобы лично возглавить, лично открыть, лично выслушать все доклады от первого до последнего.

Юрий Николаевич на семинарах – это особая тема. Я не помню случая, чтобы он пропустил хотя бы один доклад. Всегда в первом ряду, сбоку с ручкой наготове. Поразительная работоспособность этого человека проявлялась в том, что он никогда не дремал и, по-видимому, почти не отвлекался. На заседании оргбюро, когда решали, что публиковать, а что забраковать, ясная позиция по каждому пункту. Строгость при отборе материала сочеталась с доброжелательностью: и «старых» участников нельзя обидеть, и молодым нужно открыть дорогу на следующие заседания.

Юрий Николаевич был очень пунктуален. Как тщательно он продумывал планы работы семинара! Потому и шло все как по маслу, потому-то и оказывались выполненными все (известные мне) его начинания. Недавно завершено издание четырехтомного справочника по надежности систем энергетики. А первый по времени – «Надежность систем газо- и нефтеснабжения» – вышел под моей редакцией в 1994 году. Сколько сил потребовалось для его выпуска. Но о потраченном времени, силах я не жалею. Сигнальный экземпляр в твердом переплете – все, как положено, – я отдал Юрию Николаевичу буквально за два дня до его смерти. Он был, как мне показалось, бодр, энергичен и очень обрадовался первой ласточке, первому реальному свидетельству того, что эпохальная идея будет реализована. Слава Богу, что я не отложил это на несколько дней, оправдывая себя наступающими праздниками или чем-либо еще.

Отмечу еще некоторые, особенно запомнившиеся черты Юрия Николаевича. Меня поражала его память на лица и имена-отчества. В преддверии открытия очередного заседания семинара, встречаясь с кем-либо из прибывших, мучительно соображаю, видел ли я раньше этого человека. Юрий Николаевич пожимает ему руку, обращается по имени-отчеству, а после выясняется, что этот участник появился на семинаре во второй раз после двух-трехлетнего отсутствия.

Об атмосфере, царившей в СЭИ, с гордостью говорят все, кто там работал и работает. Иногородним, приезжавшим в Иркутск, особенно приятно было оказаться в работоспособном жизнерадостном коллективе. Я так просто оттаивал после Москвы с ее византийскими интригами, с ее принципами «думаю одно, говорю другое, делаю третье». Нельзя, конечно, ставить все в заслугу Юрию Николаевичу. Но без него, наверное, не было бы той ауры, он был признанным формальным лидером коллектива, хорошо в него вписывался. В эпоху, когда слова живого нельзя было прочесть в газетах и журналах (разве что только на заборах), я, как и другие гости СЭИ, с наслаждением от корки до корки прочитывал стенные издания с вольными шуточками в адрес руководства. Руководство считало и это творчество естественным и,

¹ Из книги «Академик Юрий Николаевич Руденко. Воспоминания о жизни и деятельности». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2001. – 295 с.

следовательно, попустительствовало. Не помню, чтобы в какой-то неофициальной компании присутствие Юрия Николаевича вызывало бы скованность и сдерживало языки.

Видимо, болью за Россию объясняется его резкое неприятие изменений в общественно-политической жизни во второй половине 80-х и особенно в 90-х годах. Для меня он был и остается образцом человека и ученого, потеря которого чувствуется постоянно. Его роль в энергетической науке с годами не только не теряется, но становится более осязаемой.

6. О семинаре и близком человеке¹

Е.М. Червонный

Наше знакомство с Ю.Н. Руденко состоялось в январе 1973 года во время совещания группы специалистов во ВНИИЭ, созванном для уточнения программы разработки нормативов надежности электроснабжения.

В 1987 году была организована секция развития и функционирования электроэнергетических и теплоснабжающих систем Научного совета по комплексным проблемам энергетики ОФТПЭ АН СССР, председателем которой был утвержден Ю.Н. Руденко. Все основные принципы работы секции строились по тем же правилам, что и работа семинара, и это обеспечило высокую эффективность ее работы.

Мои деловые и товарищеские встречи с Юрием Николаевичем продолжались 21 год – сначала на заседаниях семинара по надежности, а потом и секции, в состав членов которой я был введен. Были встречи и в Иркутске, когда меня приглашали для участия в заседаниях специализированного совета по защита диссертаций в СЭИ, и в Горьком, куда Юрий Николаевич приезжал несколько раз по служебным делам.

Если вначале наши встречи носили чисто деловой характер, то вскоре они переросли в товарищеские. По завершении деловой части всегда проходили беседы на вольные темы за дружеским ужином. Когда встречи бывали в Иркутске, а затем в Москве, то активное участие во всех наших беседах принимала супруга Юрия Николаевича – Инна Вячеславовна. Последняя встреча состоялась в августе 1994 года (за два месяца до смерти Ю.Н. Руденко) в Ахене (Германия) на российско-германском семинаре «Надежность электроэнергетических систем».

Юрий Николаевич всегда производил впечатление здорового и крепкого человека, и внезапная его смерть поразила всех близких и друзей. Конечно, это случилось, прежде всего, вследствие чрезмерно высоких нагрузок, которые он допускал. На заседаниях семинара, которые проходили с высокой деловой активностью участников, большинство из нас к концу каждого дня заседания

чувствовали себя предельно уставшими, а Юрий Николаевич сохранял способность активно воспринимать рассматриваемые доклады. А после заседания, еще собиралось оргбюро, его хватало и на это.

Анатолий Франс сказал: «Чтобы переваривать знания, надо поглощать их с аппетитом». Так у Юрия Николаевича на знания был волчий аппетит, которым он заражал и других, что давало высокую удовлетворенность участием в работе семинара.

На всех, кто в той или иной форме работал с Юрием Николаевичем, оказывали громадное влияние его личные качества: широчайший уровень знаний и интересов, огромная работоспособность, высочайшая ответственность и обязательность, требовательность к себе и окружающим его в работе специалистам, а также мягкость и интеллигентность в общении. Светлая память о Юрии Николаевиче, выдающемся ученом и организаторе науки, уникальном по своим человеческим качествам человеке, навсегда сохранится в сердцах и делах всех, кто имел счастье общаться с ним.

Заключение

Жизнь и деятельность Юрия Николаевича Руденко стали ярким отражением эпохи – трагической, полной испытаний, но и отмеченной великими научными свершениями. Пройдя через личные утраты, войну и лишения, он силой воли, самообразованием и невероятной работоспособностью поднялся до вершин отечественной и мировой энергетической науки. Его научное наследие, связанное с системным подходом к управлению и обеспечению надежности энергокомплексов, остается актуальным и сегодня.

Однако пожалуй, не менее значимым наследием является его человеческий образ. Воспоминания коллег и друзей рисуют портрет человека кристальной честности, бескомпромиссной принципиальности, ответственного руководителя и преданного друга. Он сочетал в себе требовательность и строгость с глубочайшей интеллигентностью, отзывчивостью и мягким юмором. Его умение создавать творческую, демократичную атмосферу в коллективе, его «донкихотская» в лучшем смысле этого слова преданность долгу и идеалам служения науке и стране стали эталоном для всех, кто его знал.

Скоропостижная кончина Юрия Николаевича в разгар общественных потрясений 1990-х годов символически завершила жизненный путь человека, чья система ценностей и мировоззрение сформировались в иную эпоху и вступили в болезненное противоречие с новой реальностью.

Его уход – это потеря не только для науки, но и для российской интеллигенции как сословия, для которого понятия чести, долга и служения были не пустыми словами. Память о Юрии Николаевиче Руденко – ученом, организаторе и человеке необычайной душевной силы и обаяния – навсегда останется светлым и вдохновляющим примером.

¹ Из книги «Академик Юрий Николаевич Руденко. Воспоминания о жизни и деятельности». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2001. – 295 с.



GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY

The Gnedenko e-Forum has been established by the International Group On Reliability (I.G.O.R.). The Forum is named after outstanding probabilist and statistician Boris Vladimirovich Gnedenko. The I.G.O.R.'s purpose is promoting contacts between members of the World reliability community and expanding professional news and information (new publications, forthcoming events, etc.).

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 опубликует 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>

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, межстрочный 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, межстрочный 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, межстрочный 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, межстрочный 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 подрисуночные 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). Подрисуночная 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 подрисуночной подписи не ставится. *При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать!* Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисуночном 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 $y = a \cdot x + b$, тогда...,
либо набираться в отдельной строке, с выравниванием по центру, например:

$$y = a \cdot x + b.$$

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:

$$y = a \cdot x + b. \quad (1)$$

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.

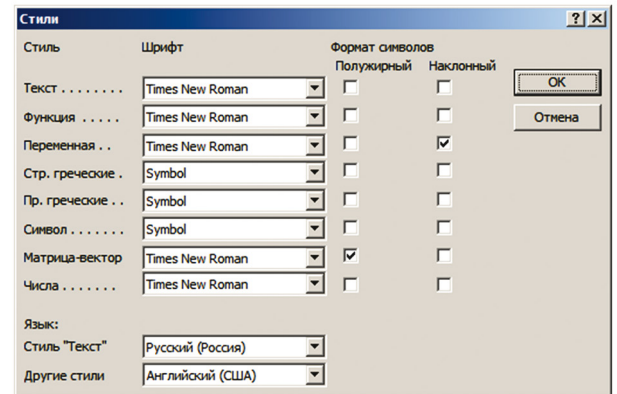
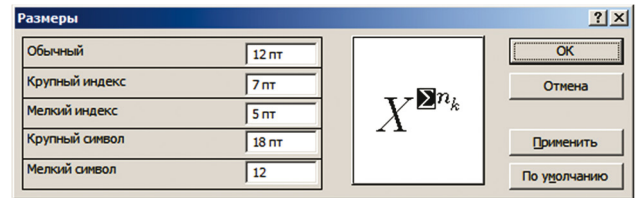
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

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-

тированием 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 удастся 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 набирается 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

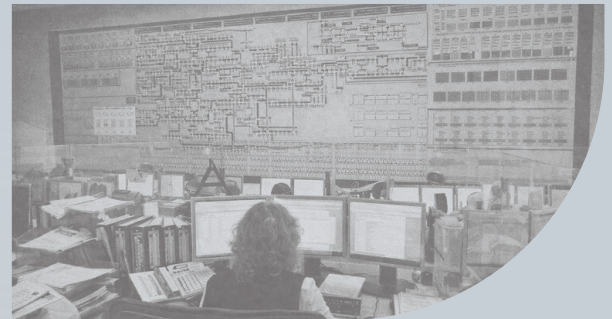
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ
АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ» (АО «НИИАС»)



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

