

НАДЕЖНОСТЬ

ISSN 1729-2646
e-ISSN 2500-3909

ТОМ **25**, №3

2025

НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

В НОМЕРЕ

- ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
- СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ВАГОНОСТРОЕНИЯ
- ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И КЛАССИФИКАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ
- ПОНЯТИЕ «НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ»
- ПРОБЛЕМАТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗВЕЩЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ
- КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АСУ ТП ВЕРХНЕГО УРОВНЯ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ КИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
- ЦИФРОВОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА
- ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПОИСКА В ШИРИНУ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА
- МОЯ ГЕОГРАФИЯ РАБОТ ПО НАДЕЖНОСТИ

НИИАС

Информатизация, автоматизация
и связь на железнодорожном транспорте



НИИАС

www.nias.ru

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, эксперт Научного совета при Совете Безопасности РФ, 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, 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 «Управление и защиты информации» Российского университета транспорта (МИИТ) (Москва, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140,

г. Москва, ул. Русаковская, д. 13, стр. 5,

2 этаж, пом. III/6-7

Подписано в печать 11.09.2025

Объем 92, Тираж 500 экз, Заказ № 19620

Формат 60x90/8, Бумага глянцевая

Журнал издается ежеквартально с 2001 года, стоимость одного экземпляра 1210 руб., годовой подписки 4840 руб., телефон редакции 8 (495) 967-77-05, e-mail: dependability@bk.ru

Статьи рецензируются.

Статьи опубликованы в авторской редакции.

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

Системный анализ в задачах надёжности и безопасности

Махутов Н.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Волохов Г.М., Красюков Н.Ф., Протопопов А.Л. Долговечность элементов подвижного состава при циклическом нагружении 3

Булатов В.В., Белоусова М.В. Сбор и обработка информации о надёжности на предприятиях вагоностроения..... 12

Автоношкин А.М., Куминов В.П., Сидоренко В.Г., Смецкая А.С. Интеллектуальная система анализа и классификации генераторов псевдослучайных чисел 21

Дискуссия по терминологии надёжности

Дубицкий М.А. Понятие «надёжность систем энергетики» 29

Вопросы автоматизации и управления процессами на транспорте

Радковский С.А., Трунаев А.М. Проблема формирования извещения на железнодорожных переездах 34

Методы и системы защиты информации. Информационная безопасность

Попов П.А., Розенберг Е.Н., Сабанов А.Г., Шубинский И.Б. Концепция обеспечения комплексной безопасности АСУ ТП верхнего уровня управления для объектов КИИ железнодорожного транспорта 42

Интеллектуальные транспортные системы

Михалевич И.Ф. Цифровой испытательный стенд анализа безопасности объектов критической информационной инфраструктуры интеллектуальных систем водного транспорта.... 50

Организация производства на транспорте

Кузьмин Д.В. Использование алгоритма поиска в ширину при решении задач пространственного развития инфраструктуры наземного транспорта 60

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

М.А. Ястребенецкий. Моя география работ по надёжности..... 68

Редакция рекомендует 77

Гнеденко – Форум 80

Долговечность элементов подвижного состава при циклическом нагружении

Durability of rolling stock elements under cyclic loading

Махутов Н.А.¹, Коссов В.С.², Оганьян Э.С.^{2*}, Волохов Г.М.², Красюков Н.Ф.², Протопопов А.Л.²
Makhutov N.A.¹, Kossov V.S.², Oganyan E.S.^{2*}, Volokhov G.M.², Krasnyukov N.F.², Protopopov A.L.²

¹Институт Машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН)

²Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)

²JSC Research and Design Institute for Rolling Stock (JSC VNIKTI), Kolomna, Russian Federation

*oganian-es@vnikti.com



Махутов Н.А.



Коссов В.С.



Оганьян Э.С.



Волохов Г.М.



Красюков Н.Ф.



Протопопов А.Л.

Резюме. В результате длительной работы экипажной части тягового подвижного состава (рамы и кузова, их шкворневых узлов, рам тележек, осей колесных пар и др.), под действием знакопеременных циклических нагрузок происходит деградация прочностных свойств металла деталей, снижается их сопротивление усталости, что может впоследствии привести к разрушению конструкции. Поэтому прочность конструкций локомотивов и вагонов необходимо подтверждать не только коэффициентами запаса, как предусмотрено действующими нормативами, но и расчетами на долговечность (ресурс), конструкций с заданными уровнями надежности. **Цель.** Совершенствование традиционных подходов к оценке и обеспечению безопасной эксплуатации подвижного состава. **Метод.** Оценка ресурса и срока службы элементов конструкции выполняется расчетно-экспериментальными методами с использованием методов, разработанных Институтом Машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН), адаптированных к конструкциям железнодорожного подвижного состава на базе опыта их эксплуатации и с использованием данных, накопленных ВНИКТИ. **Результат.** Расчеты долговечности и ресурса критически важных объектов, определение приемлемого уровня риска эксплуатации локомотива. **Заключение.** Риск-ориентированный подход способствует повышению безопасности движения на железнодорожном транспорте.

Abstract. As a result of lasting operation of the undercarriages of traction rolling stock (frame and body, their pivot assemblies, bogie frames, axles of wheel pairs, etc.) under alternating cyclic loads, the strength properties of the metal parts degrade, their fatigue resistance declines, which may eventually cause the structure's destruction. Therefore, the strength of the structures of locomotives and wagons is to be validated not only through safety margins as per the current regulations, but also through durability (life) predictions for such structures with predefined levels (dependability). **Aim.** To improve the conventional approaches to assessing and ensuring safe operation of rolling stock. **Method.** The life of structural elements is estimated using computations and experiments involving methods developed by the Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN) adapted to the structures of railway rolling stock given the existing experience of their operation and using the data collected by VNIKTI. **Results.** Calculations of the durability and life of critical items, definition of the acceptable level of risk of locomotive operation. **Conclusion.** A risk-based approach helps improve railway traffic safety.

Ключевые слова: долговечность, ресурс, циклическое нагружение, сопротивление усталости, повреждаемость, живучесть, безопасность эксплуатации, риск-анализ.

Keywords: durability, life, cyclic loading, fatigue resistance, damage rate, survivability, operational safety, risk analysis.

Для цитирования: Махутов Н.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Волохов Г.М., Красюков Н.Ф., Протопопов А.Л. Долговечность элементов подвижного состава при циклическом нагружении // Надежность. 2025. №3. С. 3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-3-9>

For citation: Makhutov N.A., Kossov V.S., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Krasnyukov N.F., Protopopov A.L. Durability of rolling stock elements under cyclic loading. Dependability 2025;3: 3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-3-9>

Поступила: 21.03.2025 / **После доработки:** 14.05.2025 / **К печати:** 25.07.2025

Received on: 21.03.2025 / **Revised on:** 14.05.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Проблемы прочности, надежности и ресурса элементов конструкций железнодорожного подвижного состава (ПС) обуславливают необходимость совершенствования традиционных подходов к обеспечению их безопасной эксплуатации. Решение этих проблем возможно путем установления фактического состояния объекта с учетом накопленных в эксплуатации циклических, коррозионных, износных и других повреждений, определяющих наступление его предельного состояния на этапах жизненного цикла.

Следовательно, актуальным является научно-техническое обоснование безопасной эксплуатации объекта по ресурсу или предельному состоянию, в частности по сопротивлению усталости (мало- и многоцикловой) на основе расчетных, экспериментальных и эксплуатационных данных.

Поэтому прочность конструкций локомотивов и вагонов необходимо подтверждать не только коэффициентами запаса, как предусмотрено действующими нормативами (табл. 1), но и расчетами на долговечность (ресурс), которые учитывали бы технологические, конструкционные и эксплуатационные факторы, обуславливающие работоспособность и безопасность эксплуатации конструкций с заданным уровнем надежности [1–5].

Оценка долговечности элементов конструкций выполняется расчетно-экспериментальными методами с использованием методов разработанных Институтом Машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН), адаптированных к конструкциям железнодорож-

ного подвижного состава на базе опыта их эксплуатации и с использованием накопленных АО «ВНИКТИ» результатов научно-исследовательских работ.

В основе применяющихся методов – корректированная линейная гипотеза (В.П. Когаев, Н.А. Махутов) суммирования усталостных повреждений Пальмгрена – Майнера [5]. Накопленная повреждаемость a_p принимается в этом случае в пределах от 0,5 до 2,0 (вместо 1,0).

Условие разрушения имеет вид:

$$\frac{N_{сум}}{N_0} = \frac{a_p}{n_p^m \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \geq \frac{1}{n_p}} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \right)^m \cdot t_i}$$

при $\sigma_{ai} \geq 0,5 \cdot \sigma_{-1д}$, и коэффициенте перегрузки (предельный коэффициент нагруженности), определяемом выражением:

$$n_p = \frac{\sigma_{a\max}}{\sigma_{-1д}}$$

где $\sigma_{a\max}$ – максимальное напряжение в блоке нагружения, который вызывает разрушение детали при числе циклов $N_{сум}$; $\sigma_{-1д}$ – предел выносливости детали; $t_i = \frac{n_i}{N_i}$ – отношение количества циклов n_i амплитуды σ_{ai} к соответствующему разрушающему количеству циклов N_i ; N_0 – число циклов, соответствующее точке перелома кривой усталости; m – показатель степени в уравнении наклонной ветви кривой усталости.

Для расчета долговечности с целью учета эксплуатационных нагрузок различного уровня и имеющих

Табл. 1. Критерии, применяемые для оценки прочности

| Подвижной состав | Оценка статической прочности по допускаемым напряжениям [1, 2] | | Оценка сопротивления усталости по допускаемому коэффициенту запаса n [1, 2] |
|------------------|--|---|--|
| | I режим | III режим | |
| Локомотивы | $\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,90 \cdot \sigma_{0,2}$ | $\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,55 \cdot \sigma_{0,2}$ | $n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} \cdot \sigma_{a\sigma} + \psi \cdot \sigma_m} \geq 2$ |
| Вагоны | $\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,90 \cdot \sigma_{0,2}$ | $\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,60 \cdot \sigma_{0,2}$ | $n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} \cdot \sigma_{a\sigma}} \geq 1,4 \dots 1,8$ |

Примечание: σ_{σ} – эквивалентные (по Мизесу) напряжения в конструкции; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала; σ_{-1} – предел выносливости стандартного образца; K_{σ} – коэффициент понижения предела выносливости; $\sigma_{a\sigma}$ – амплитуды эксплуатационных циклических напряжений; σ_m – среднее напряжение цикла; ψ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла.

Табл. 2. Блок нагружения в виде ступенчатой последовательности амплитуд σ_{ai} с числом циклов n_i и их распределением в относительных величинах

| σ_{ai} , МПа | n_i , МПа | $A_i = \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}}$ | $t_i = \frac{n_i}{N_{\Sigma}}$ | $A_i^m \cdot t_i$ |
|---------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------|-------------------|
| σ_{a1} | n_1 | A_1 | t_1 | $A_1^m \cdot t_1$ |
| σ_{a2} | n_2 | A_2 | t_2 | $A_2^m \cdot t_2$ |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| $\sigma_{a\max}$ | n_k | 1,0000 | t_k | $A_k^m \cdot t_k$ |
| Σ | $\Sigma n_i, (N_{\Sigma}^{\delta})$ | - | 1,0 | - |

Табл. 3. Параметры ресурса литой боковой рамы тележки с учетом факторов технологической дефектности

| Факторы дефектности | Ресурс | |
|--|-------------------------------------|--|
| | Число разрушающих циклов нагружения | Лет эксплуатации при пробеге 100 тыс. км/год |
| Технологические дефекты отсутствуют, размеры поперечного сечения номинальные | $86 \cdot 10^6$ | 26 |
| Остаточные напряжения после заварки литейных дефектов в радиусе R55 без последующей термообработки | $13 \cdot 10^6$ | 3,8 |
| Внутренний дефект литья в зоне R55 (газовая пора размером 15x5x5 мм на глубине 1/3 толщины стенки) | $5,8 \cdot 10^6$ | 1,7 |

случайный характер, формируют суммарный режим нагружения – блок или спектр эксплуатационных нагрузок (табл. 2), представляемый распределением частот, т.е. гистограмм (рис. 1) или плотностью вероятностей амплитуд напряжений (рис. 2).

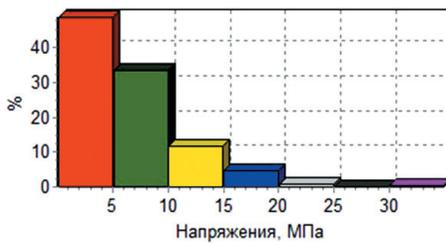


Рис. 1. Гистограмма распределения текущих значений амплитуд динамических напряжений в раме тележки тепловоза

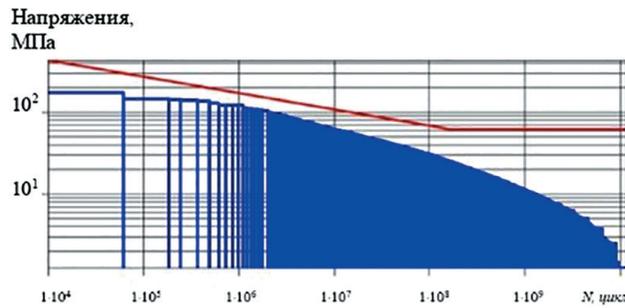


Рис. 2. Спектр нагрузок (амплитуд напряжений)

В табл. 3 представлены результаты расчета ресурса боковой рамы тележки грузового вагона в зависимости от допускаемой (по ГОСТ 32400-2013 «Литые детали тележек. Технические условия») технологической дефектности, моделируемой в расчете в виде трещино-подобного дефекта.

Учитывается и следующее. Как известно, при построении кривой усталости правая ветвь обычно условно принимается горизонтальной (т.е. долговечность при этом уровне напряжений считается неограниченной). Но, как установлено, для деталей, работающих в многогигацикловой области нагружения (оси, колеса, рамы и др.), правая ветвь оказывается также наклонной, хотя и более пологой, т.е. с гораздо большей величиной показателя m (рис. 3).

При этом подразумевается, что для натуральных объектов найдена взаимосвязь между углами наклона правой

(m_2) и левой (m_1) ветвей кривой усталости, описываемой формулой вида:

$$\sigma_{ai}^m \cdot N_i = const.$$

В зависимости от требуемой надежности оценки величины ресурса, кривая усталости детали может быть эквидистантно опущена (рис. 3) для значения предела выносливости, рассчитанного с учетом квантиля нормального распределения (U_p) и коэффициента вариации (v_{-1}) по формуле:

$$\sigma_{-1\theta} = \overline{\sigma_{-1\theta}} \cdot (1 - U_p \cdot v_{-1}).$$

При этом используются параметры нагруженности и характеристики сопротивления усталости, полученные путем испытаний натуральных деталей. Представленные требования и критерии прочности, ресурса и безопасности объектов, их критических элементов на жизненном цикле предусмотрены разработанным АО «ВНИКТИ» совместно с ИМАШ РАН ГОСТ Р 57445-2017 [7].

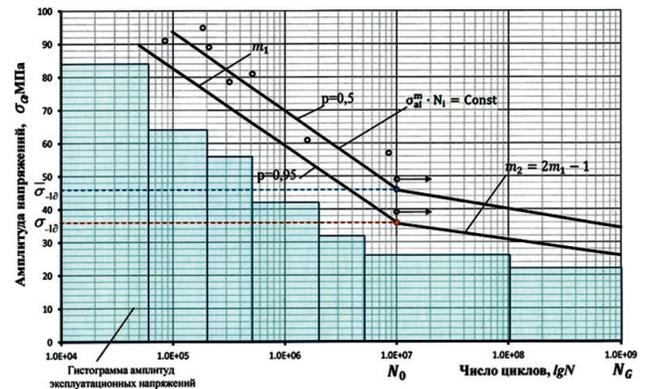


Рис. 3. Характеристики нагруженности и сопротивления усталости детали: m_1, m_2 – показатели угла наклона кривой усталости; N_0, N_G – базы испытаний в многоцикловой и гигацикловой области; $\overline{\sigma_{-1\theta}}, \sigma_{-1\theta}$ – пределы выносливости детали при вероятности неразрушения $P = 0,50$ и $P = 0,95$ соответственно

Развивая риск-ориентированный подход к обеспечению долговечности, целесообразно рассматривать безопасность ПС в нештатных ситуациях, которые случаются на железнодорожном транспорте по причине отказа техники, человеческого и других факторов, в результате чего повреждаются единицы ПС, сходят с рельсов. При этом могут травмироваться и получать уве-



Рис. 4. Авария в грузовом поезде по причине излома боковой рамы тележки вагона

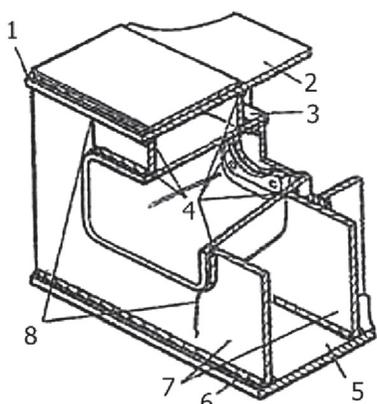
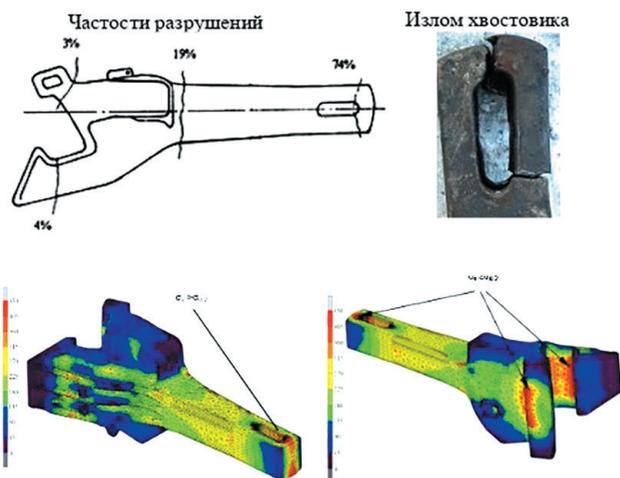


Рис. 5. Узел боковой рамы тележки моторвагона:
1 – верхний пояс; 2 – шкворневая балка; 3 – карман демпфера; 4 – зоны непровара; 5 – боковина; 6 – нижний пояс; 7 – стенки; 8 – зоны образования усталостных трещин

чья члены локомотивных и поездных бригад, пассажиры поезда. Опасным источником таких случаев являются изломы деталей ПС. К критически важным элементам конструкций, способным инициировать их, относятся, прежде всего: колесные пары, сцепные устройства, рамы тележек, главные рамы, шкворневые узлы, элементы крепления тяжелого оборудования и тягового привода. Примеры разрушений подобных деталей приведены на рис. 4–7. Проблема обеспечения безопасности в этих условиях становится особенно актуальной в связи с развитием высокоскоростного и тяжеловесного движения.

Однако в рамках сложившихся подходов при создании подвижного состава разработка технических заданий (ТЗ) и технико-экономическое обоснование (ТЭО) выполняются обычно без учета требований по безопасности его эксплуатации. Дело в том, что действующая традиционная нормативно-техническая база построена в основном на рассмотрении условий в направлении от простых к сложным условиям (табл. 4). Задачи обеспечения эксплуатационной безопасности потенциально опасных объектов решаются по принципу, что если удовлетворены действующие нормативы [1, 2], то специальный количественный анализ безопасности уже не требуется [3–5].



Напряженное состояние корпуса от растяжения силой 2,5 МН
Рис. 6. Характер разрушений корпуса автосцепки

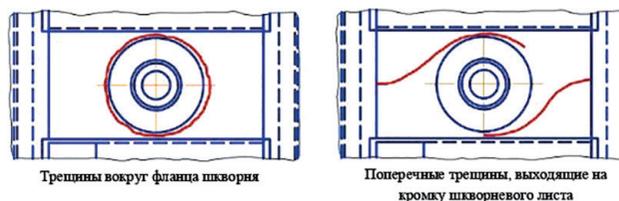


Рис. 7. Общие виды трещин в околошовной зоне шкворневого узла балки рамы тепловоза

Это привело к тому, что для анализа каждой нештатной ситуации с тяжелыми последствиями создаются специальные комиссии и разрабатываются необходимые ремонтно-восстановительные мероприятия.

В риск-ориентированном подходе [4, 9] изначально решается задача оценки достижения заданных (приемлемых) рисков возможных отказов, разрушений и аварий с нанесением вреда человеку, технике и окружающей среде (табл. 4).

С этой целью совершенствуется нормативно-методическая база, предусматривающая:

- применение современных методов анализа нагруженности, характеристик сопротивления усталости

Табл. 4. Структура обеспечения механической безопасности объектов ж/д транспорта

| Годы | Этапы развития | Базовые требования | | Критерии технического состояния | Обозначение | Признаки предельных состояний | Построение анализа требований |
|------|----------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------|--|-------------------------------|
| | | Критически Важные Объекты | Риск | | | | |
| 2020 | VII | Критически Важные Объекты | Риск | Приемлемые риски отказов, аварий и катастроф | R | Превышение приемлемых рисков | |
| 1990 | VI | Потенциально Опасные Объекты | Безопасность | Управление безопасностью | S | Критическое состояние: угроза разрушения, аварии, нанесение вреда человеку, окружающей среде | |
| 1980 | V | Объекты Технического Регулирования | Живучесть | Трещиностойкость | L_{1d} | Предельный размер дефекта. Критическое значение КИН | |
| 1970 | IV | | Надежность | Отказоустойчивость | P_{QR} | Достижение вероятности выхода из строя, отказа | |
| 1960 | III | | Ресурс | Долговечность | R_{Nt} | Достижение предельных: числа циклов, износа, деформаций | |
| 1940 | II | | Жесткость, устойчивость | Сохранение размеров и формы | $R\delta$ $R\lambda$ | Потеря устойчивости. Остаточная деформация. Вибрация (резонанс) | |
| 1920 | I | | Прочность | Неразрушаемость | $R\sigma$ | Трещиноподобный дефект. Истощение запаса. Трещина | |

Табл. 5. Пример расчета для грузовых локомотивов частоты нештатных событий с приемлемым уровнем риска

| № п/п | Наименование показателя | Тепловоз | Электровоз |
|-------|--|-----------------------------|----------------------|
| 1 | Допустимая частота событий за 1 час эксплуатационной работы (этапное значение критерия RAC-TS, ЖДМ-2007, № 12, с 60-65), p_3 | 10^{-9} час ⁻¹ | |
| 2 | Среднетехническая скорость – V , км/ч | 45 | 60 |
| 3 | Среднегодовой пробег – L , км | 121 200 | 167 040 |
| 4 | Продолжительность эксплуатационной работы за 1 год – $T_1 = L/V$, час | 2 693 | 2 784 |
| 5 | То же за назначенный срок службы (45 лет) – $T_{45} = T_1 \cdot 45$, час | 121 200 | 125 280 |
| 6 | Приемлемая частота событий за 1 год эксплуатации – $p_1 = p_3 \cdot T_1$ | $2,69 \cdot 10^{-6}$ | $2,78 \cdot 10^{-6}$ |
| 7 | То же за назначенный срок службы, т.е. за 45 лет – $p_{45} = p_3 \cdot T_{45}$ | $1,21 \cdot 10^{-4}$ | $1,25 \cdot 10^{-4}$ |

и живучести несущих конструкций и ответственных деталей ПС;

– разработку критериев безопасности по условиям прочности, долговечности и рисков, определение их приемлемых значений (табл. 5);

– моделирование экстремальных и аварийных условий и видов нагружения объекта;

– моделирование совместных и отдельных компонентов и видов (механических, тепловых и др.) воздействий на исследуемые объекты;

– включение в ТЗ и ТЭО требований безопасности критически важных объектов в нештатных (запроектных) условиях.

В результате могут быть достигнуты приемлемые риски эксплуатации потенциально опасных и критически важных узлов и деталей ПС, что может способствовать повышению безопасности движения на железнодорожном транспорте.

Список литературы

- ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2014. 72 с.
- ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2016. 53 с.
- Обеспечение безопасной эксплуатации подвижного состава на основе стратегии управления ресурсом на этапах жизненного цикла / Э.С. Оганьян, В.С. Коссов, Г.М. Волохов, М.Н. Овечников, А.С. Гасюк // Железнодорожный транспорт. 2018. № 12. С. 36–40.
- Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / Под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. М.: ЛЕНАНД, 2018. 720 с.

5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта» Раздел II. Техногенная безопасность железнодорожного транспорта: коллективная монография / Н.В. Абросимов, В.А. Акимов, А.В. Алешин [и др.]; науч. рук. чл.-корр. РАН Н.А. Махутов. М.: МГОФ Знание, 2021. 488 с.

6. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / Под ред. А.П. Гусенкова. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

7. ГОСТ Р 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса. М. Стандартинформ, 2017. 26 с.

8. Алгоритм снижения риска возникновения нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте по условиям безопасности подвижного состава / В.С. Коссов, Н.Ф. Красюков, Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, Д.А. Князев / Материалы третьей международной научно-технической конференции: «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы», г. Ташкент, 17–20 апреля 2024 г. Ташкент: ТГТУ, 2024. 488 с.

9. Риск-ориентированный подход и критерии его использования при оценке безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте / Г.М. Волохов, Э.С. Оганьян, А.А. Лунин, Д.А. Князев, Н.Ф. Красюков // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Третьей Международной научно-технической конференции, г. Ташкент, 17–20 апреля 2024 г. Ташкент: ТГТУ, 2024. 488 с.

References

1. GOST R 55513-2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic performance. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

2. GOST R 33211-2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic performance. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

3. [Ensuring safe operation of rolling stock based on life management strategy at life cycle stages]. Oganyan E.S., Kossov V.S., Volokhov G.M., Ovechnikov M.N., Gasyuk A.S. *Zheleznodorozhny transport* 2018;12:36-40. (in Russ.)

4. Matters of strength, technological safety and structural materials science. Makhutov N.A., Matvienko Yu.G., Romanov A.N, editors. Moscow: LENAND; 2018. (in Russ.)

5. Abrosimov N.V., Akimov V.A., Alyoshin A.V. et al. Makhutov N.A., corresponding member of RAS, academic adviser. Russia's security. Legal, socio-economic, scientific, and technological aspects. In: Safety of railway transportation. Section II. Technological safety of railway transportation: a collective monograph. Moscow: MGOF Znanie; 2021. (in Russ.)

6. Kogaev V.P. Gusenkov A.P., editor. [Time-variable strength calculation]. Moscow: Mashinostroenie; 1993. (in Russ.)

7. GOST R 57445-2017. Railway technical means. General requirements for methods of life time estimation. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)

8. Kossov V.S., Krasnyukov N.F., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Knyazev D.A. [Algorithm for reducing the risk of contingency situations in railway transport based on rolling stock safety conditions]. In: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference Railway Rolling Stock: Problems, Solutions, Prospects. Tashkent, April 17-20; 2024. Tashkent: TSTU; 2024. (in Russ.)

9. Volokhov G.M., Oganyan E.S., Lunin A.A., Knyazev D.A., Krasnyukov N.F. [A risk-oriented approach and application criteria for safety assessment of the railway transportation process]. In: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference Railway Rolling Stock: Problems, Solutions, Prospects. Tashkent, April 17-20; 2024. Tashkent: TSTU; 2024. (in Russ.)

Сведения об авторах

Махутов Николай Андреевич – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ИМАШ РАН.

Адрес: Малый Харитоньевский переулок, д.4, Москва, Российская Федерация, 101000. E-mail: info@imash.ru

Коссов Валерий Семенович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: info@vnikti.com

Оганьян Эдуард Сергеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: oganian-es@vnikti.com

Волохов Григорий Михайлович – доктор технических наук, главный научный эксперт АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: volokhov-gm@vnikti.com

Красюков Николай Федорович – кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: oganian-es@vnikti.com

Протопопов Андрей Леонидович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Москов-

ская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: protopopov-al@vnikti.com

About the authors

Nikolay A. Makhutov, Doctor of Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, IMASH RAN. Address: 4 Malyy Kharitonyevsky Pereulok, Moscow, 101000, Russian Federation. E-mail: info@imash.ru

Valery S. Kossov, Doctor of Engineering, Professor, Director General, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: info@vnikti.com

Eduard S. Oganyan, Doctor of Engineering, Chief Researcher, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: oganian-es@vnikti.com

Grigory M. Volokhov, Doctor of Engineering, Chief Scientific Expert, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: volokhov-gm@vnikti.com

Nikolay F. Krasnyukov, Candidate of Engineering, Lead Engineer, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: oganian-es@vnikti.com

Andrey L. Protopopov, Candidate of Engineering, Lead Researcher, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: protopopov-al@vnikti.com

Вклад авторов в статью

Махутов Н.А. – разработка требований к методам определения ресурса, риск-ориентированный подход.

Коссов В.С. – научно-техническое обоснование безопасности эксплуатации объекта на основе расчетно-экспериментальных исследований.

Волохов Г.М. – риск-анализ конструкций, построение структуры отказов потенциально-опасных узлов подвижного состава.

Красюков Н.Ф. – моделирование экстремальных и аварийных ситуаций и видов нагружения объектов.

Протопопов А.Л. – анализ нагруженности, характеристик сопротивления усталости и живучести деталей подвижного состава с применением методов механики разрушения.

Оганьян Э.С. – формирование и анализ спектра нагруженности, оценка долговечности конструкций подвижного состава на основе гипотез суммирования повреждений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



1980

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

1960

Разработаны и внедрены отечественные системы автоматической локомотивной сигнализации.



1956

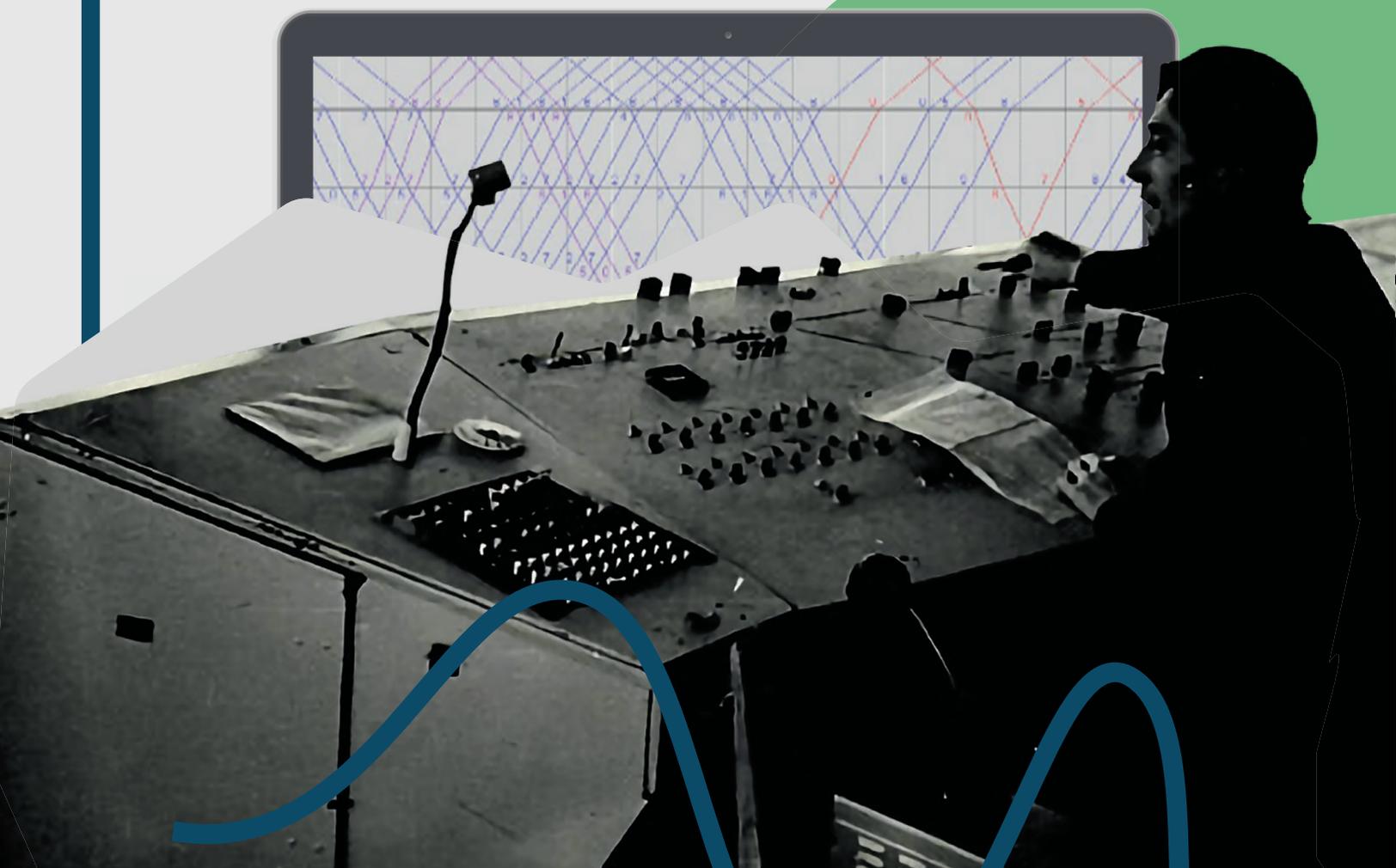
14 февраля 1956 года Министр путей сообщения СССР Б.П. Бещев подписал приказ о создании Конструкторского бюро Главного управления сигнализации и связи (КБ ЦШ).

1970

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

1990

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





2000

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

Старт разработок в области комплексной интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ). Решение локальных функциональных задач: анализ надежности, управление рисками и ресурсами.

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

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

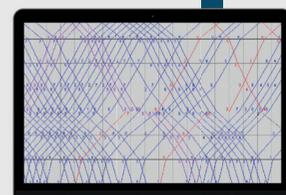


НИИАС



2010

2020



2025



nias.ru



[vnias official](https://vniasofficial.com)

Сбор и обработка информации о надежности на предприятиях вагоностроения

Collecting and processing dependability-related information in car building companies

Белоусова М.В.¹, Булатов В.В.^{2*}
Belousova M.V.¹, Bulatov V.V.^{2*}

¹ ООО «ПРОЦифру», Российская Федерация, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Российская Федерация, Санкт-Петербург

¹ ООО PROTsifru, Russian Federation, Saint Petersburg

² Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation

* bulatov-vitaly@yandex.ru



Белоусова М.В.



Булатов В.В.

Резюме. Пассажирские вагоны являются сложными техническими изделиями. Они состоят из агрегатов, узлов и компонентов, которые характеризуются определенным сочетанием деталей, находящихся во взаимодействии. Помимо этого, в современных пассажирских вагонах значительное количество автоматики и автоматизированных компонентов: система кондиционирования, электронагревательные системы, системы освещения, двери купе, наружные двери и др. При сборе данных о техническом состоянии изделий необходимо обеспечить регулярность, достоверность, своевременность и полноту информации. Известно, что качество и надежность изделия наиболее полно проявляется в процессе эксплуатации. Грамотная организация сбора и обработки информации о надежности изделия дает возможность получить достоверную информацию о его работоспособности и эффективности. В процессе эксплуатации пассажирских вагонов могут нарушаться связи между отдельными узлами и компонентами, ослабляться крепления отдельных деталей, датчиков, происходит естественный износ резиновых уплотнений. Все это приводит к снижению эксплуатационных показателей и возникновению ряда неисправностей и отказов. Для уменьшения интенсивного возрастания количества отказов требуется выполнять ряд профилактических действий, которые направлены на выявление и устранение неисправностей, а также предупреждение причин их возникновения. Прежде всего, к таким мероприятиям следует отнести техническое обслуживание и капитальный ремонт подвижного состава. Все эти мероприятия строго регламентированы в руководствах по эксплуатации как самого вагона, так и его компонентов. Приблизительный диапазон назначенного срока службы пассажирских вагонов, как и их узлов и агрегатов, составляет от 20 до 40 лет. Некоторые компоненты пассажирских вагонов производятся серийно с модификациями начала 2000-х годов. Таким образом, мы можем говорить о возможной комплексной оценке надежности изделий за весь жизненный цикл. Но это можно сделать только при сборе и обработке значительного количества информации о неисправностях, полученной как в гарантийный, так и в постгарантийный период. Эта информация должна поступать из различных источников: эксплуатирующих организаций, обслуживающих депо, вагоноремонтных заводов, которые проводят капитальные ремонты. Эта ценнейшая информация должна накапливаться и поддаваться цифровизации. В данной статье затрагивается ряд вопросов, связанных со сбором, валидацией и учетом неисправностей и отказов компонентов пассажирских вагонов. **Цель.** Рассмотреть актуальное состояние систем сбора и обработки данных о неисправностях на предприятиях вагоностроения и предложить алгоритмические и методические решения для повышения уровня автоматизации процесса обработки информации об отказах. **Методы.** В статье применяются методы системного анализа и программной инженерии. **Выводы.** Предложен алгоритм учета отказов изделий по входящим документам. Разработаны программные решения для автоматизации процесса сбора и обработки данных о неисправностях компонентов пассажирских вагонов. Рассмотрена методика учета гарантийного парка, необходимого для формирования суммарной наработки в процессе расчета показателей надежности компонентов пассажирских вагонов в процессе эксплуатации. Предложен кодификатор отказов, учитывающий особенности структурной взаимосвязи компонентов пассажирских вагонов.

Abstract. Passenger cars are complex technical products. They consist of units, assemblies, and components that are characterized by a certain combination of interacting parts. Additionally, modern passenger cars feature significant numbers of automatic subsystems and automated

components: air conditioning, electric heating systems, lighting systems, compartment doors, exterior doors, etc. The process of collecting data on the technical condition of products is to ensure the regularity, reliability, timeliness, and completeness of information. It is known that products most clearly manifest their quality and dependability in operation. A competent organisation of the collection and processing of information on a product's dependability allows obtaining reliable information on its health and performance. In the course of operation, the connections between individual units and components of passenger cars may become disrupted, the fasteners of individual parts and sensors may become loose, rubber seals may become naturally worn. All of that causes performance decline, as well as malfunctions and failures. Preventing a sharp increase in the number of failures requires performing a number of preventive actions aimed at identifying and eliminating faults, as well as preventing their root causes. First and foremost, such measures include rolling stock maintenance and overhaul. All such activities are strictly regulated in the operating manuals of both a car and its components. The specified life of passenger cars, as well as their components and units, varies roughly from 20 to 40 years. Some components of passenger cars have been in production with no major modifications since the early 2000s. That suggests that a product's dependability can be evaluated comprehensively throughout the entire life cycle. But that can only be done by collecting and processing a significant amount of information on malfunctions obtained both during the warranty and post-warranty periods. The information is to come from various sources, i.e., operating companies, service depots, car repair plants that carry out overhauls. This most valuable information is to be accumulated and be digitalisable. This paper addresses a number of matters associated with the collection, validation, and recording of faults and failures of passenger car components. **Aim.** To examine the state-of-the-art systems that collect and process fault data in engineering companies and to suggest algorithmic and methodological solutions to improve the degree of automation of failure information processing. **Methods.** The paper uses methods of system analysis and software engineering. **Conclusions.** An algorithm for recording product failures according to incoming documents is proposed. Software solutions have been developed to automate the process of collecting and processing data on malfunctions of passenger car components. The authors examined a method of tracking the warranty fleet required for defining the total operating time as part of calculating the dependability indicators of passenger car components in operation. A failure code list was proposed that takes into account the specificity of the structural relationships between passenger car components.

Ключевые слова: отказы, безотказность, сбор и обработка данных, рекламационно-пре-тензионная работа, гарантийный парк, кодификатор.

Keywords: failures, reliability, data collection and processing, claim settlement, warranty fleet, code list.

Для цитирования: Белоусова М.В., Булатов В.В. Сбор и обработка информации о надежности на предприятиях вагоностроения // Надежность. 2025. №3. С. 12-20. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-12-20>

For citation: Belousova M.V., Bulatov V.V. Collecting and processing dependability-related information in car building companies. *Dependability* 2025;3: 12-20. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-12-20>

Поступила: 02.04.2025 / **После доработки:** 01.05.2025 / **К печати:** 25.07.2025

Received on: 02.04.2025 / **Revised on:** 01.05.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей является обеспечение высокого уровня надежности подвижного состава. Эффективность перевозок пассажиров напрямую связана с оценкой показателей безотказности компонентов подвижного состава.

Для получения адекватных оценок показателей надежности компонентов подвижного состава требуется организовать процесс сбора и первичной обработки информации о неисправностях.

Рассмотрим основные этапы данного процесса более подробно.

1. Сбор данных о неисправностях

Для сбора данных об оборудовании в процессе эксплуатации на современных предприятиях применяются системы ТОиР (техническое обслуживание и ремонт).

Примерами ТОиР являются Windchill Quality Solutions и отечественная разработка 1С: ТОиР Управление ремонтами и обслуживанием оборудования.

В работах [1-3] подробно рассмотрены преимущества и недостатки подобного программного обеспечения.

Наряду с мощными программными пакетами может быть использован MS Excel [1], а также модернизация существующего программного комплекса [4].

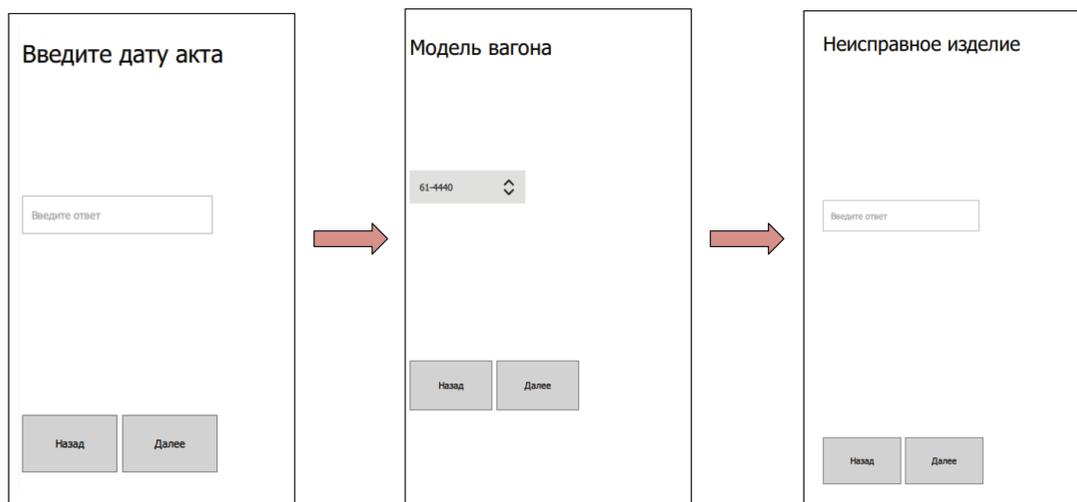


Рис. 1. Формы ввода данных акты выполненных работ для мобильного приложения

Отдельно хочется отметить разработки программного обеспечения для профильных отраслей промышленности. В [5, 6] представлено мобильное приложение для регистрации неисправностей компонентов пассажирского транспорта (рис. 1). Данная программа предназначена для применения в полевых условиях, когда требуется сформировать отчет о проведенной работе на месте ремонта за короткий промежуток времени.

В работе [7] представлена разработка стационарного программного комплекса для регистрации отказов службами качества предприятий (рис. 2). Программа разработана на базе открытой платформа Microsoft NET 6.0 в среде Visual Studio 2022.

2. Обработка данных рекламаций

Двумя основными источниками информации об эксплуатационной надежности являются рекламационный акт (рекламация) и акт выполненных работ.

Рекламация – письменное заявление потребителя установленной формы изготовителю (поставщику) на обнаруженные в период действия гарантийных обязательств дефекты и (или) несоответствие комплектности поставленных изделий требованиям технических условий (ТУ), а также требование о восстановлении комплектности или замене дефектных изделий¹.

В работе [1] представлен алгоритм работы службы качества предприятия-изготовителя продукции по входящим рекламациям.

Акт выполненных работ – документ, в котором фиксируется реальная неисправность объекта в подтверждение рекламационного акта, описываются выполненные работы по восстановлению объекта и фиксируется время восстановления.

¹ ГОСТ Р 55754-2013. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники. Система взаимоотношений изготовителей и потребителей. Введен 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.

| Номер | Дата регистрации | Дата поступления | Депо | Наименование изделия | Серийный номер изделия | Шифр изделия |
|--------------------|------------------|------------------|------|----------------------|------------------------|--------------|
| [Redacted content] | | | | | | |

Рис. 2. Интерфейс программы ввода данных о неисправностях на предприятии-изготовителе.



Рис. 3. Информация о надежности по данным из рекламации и акту выполненных работ.

Таким образом, эти два документа являются первоисточниками по средней наработке между отказами и среднему времени восстановления изделия. Все необходимые данные для учета неисправностей компонентов пассажирского транспорта представлены на схеме (рис. 3).

Чтобы принять решение о фактическом отказе, следует проводить анализ вышеуказанных документов. Рис. 4 представляет алгоритм обработки источников данных о неисправностях на примере отказов компонентов пассажирского транспорта.

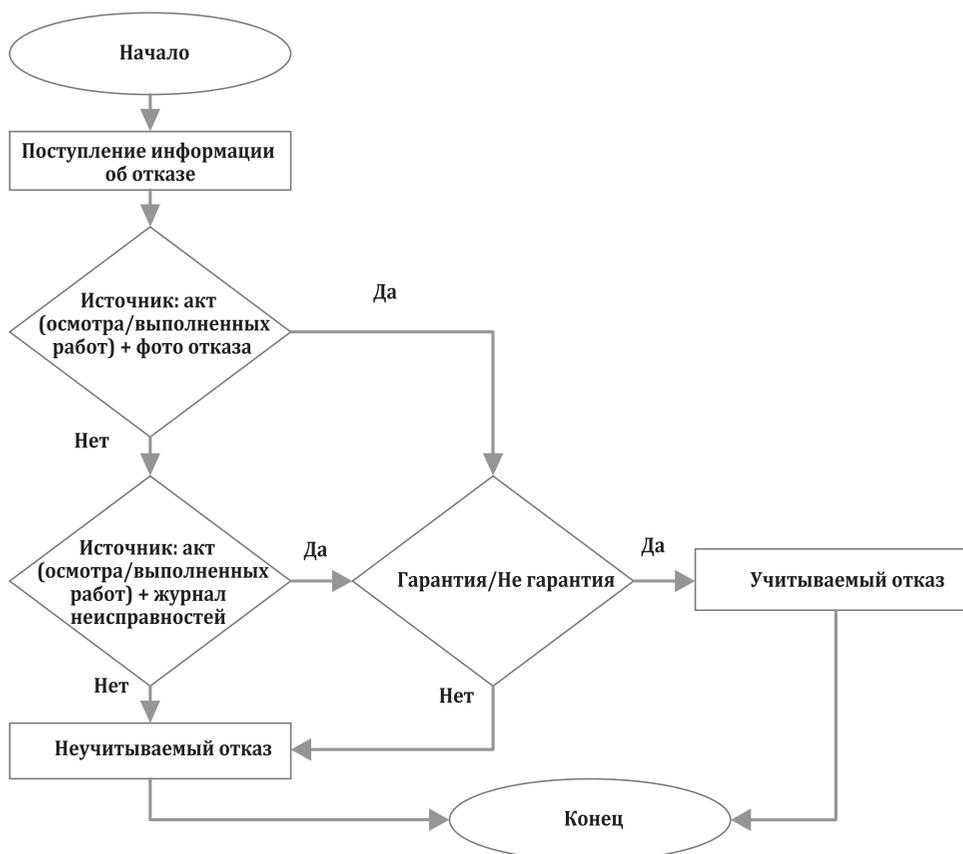


Рис. 4. Пример алгоритма учета отказа по входящим документам

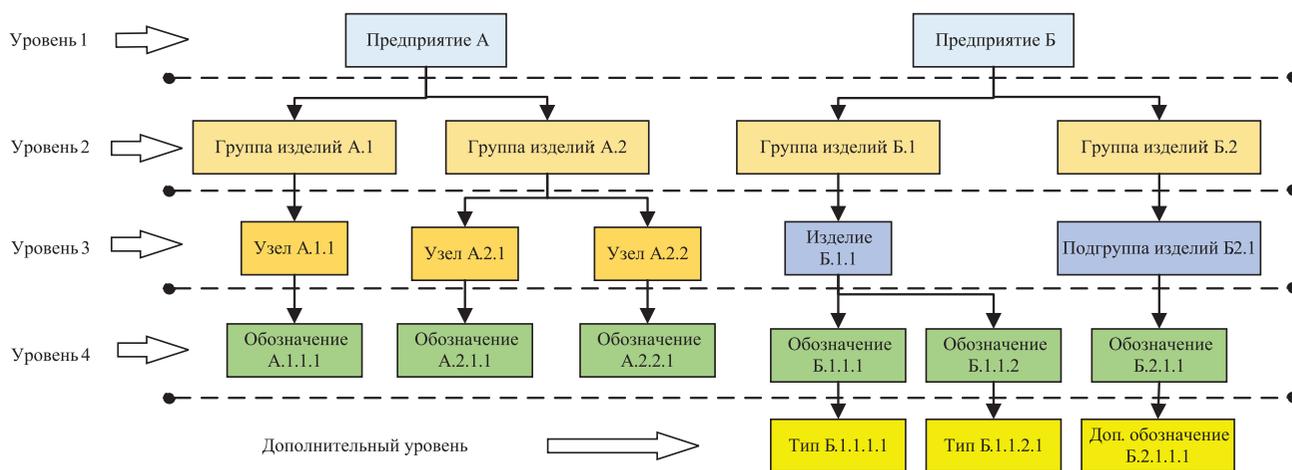


Рис. 5. Четырехуровневая модель обработки информации рекламационных актов

Специфика предприятий-изготовителей компонентов пассажирского транспорта заключается в том, что каталог продукции постоянно увеличивается: даже на базовых конструкциях изменяются массогабаритные характеристики, появляются новые исполнения. Иерархия может доходить до четырех уровней: Потребитель → Группа изделий → Изделие/Узел (рис. 5) [1].

Данная модель рекламационной работы и ее реализация на базе MS Excel подробно описана в [1].

Предприятию-изготовителю необходимо оптимизировать свои трудовые ресурсы для того, чтобы обеспечить процесс обработки, оценки и анализа заявленных претензий. В противном случае расчет параметров надежности не будет иметь смысла, а полученные значения будут далеки от действительности.

3. Кодификация отказов

Одной из основных задач кодификатора отказов является установление единых терминов, понятий, определений в области обслуживания и ремонта технических систем.

При внедрении автоматизированной системы сбора данных об отказах важной задачей является присвоение каждому признаку отказа определенного цифрового обозначения.

Можно выделить следующие основные требования, которые должны быть учтены при составлении кодификатора отказов:

- кодирование всей информации о возможной неисправности уникальным шифром;
- возможность внесения изменений в код при необходимости (его модификация);
- удобство ввода данных в базу неисправностей.

В качестве критериев оптимальности кодификатора отказов можно выделить следующие:

- краткость записи;
- отражение основных характеристик отказа;
- минимизация времени на обработку информации об отказе;
- возможность совершенствования записи без изменения ее базовой структуры.

Рассмотрим известные примеры кодификаторов отказов и выделим их основные характеристики.

Широкое применение кодификатор отказов нашел в автомобильной промышленности.

Одним из первых документов, регламентирующих систему сбора и обработки информации о надежности в автомобильной промышленности, является РТМ 37.031.004-78 «Единый классификатор неисправностей изделий автомобилестроения», разработанный НАМИ. В данном документе устанавливаются классы и коды признаков неисправностей. Основной принцип построения кода – метод порядковой регистрации. Код представляет из себя достаточно сложную цифровую комбинацию, которая включает:

- условия обнаружения (1 символ);
- место расположения (2 символа);
- характер неисправности (3 символа);
- элемент изделия (3 символа);
- причину неисправности (3 символа);
- категорию неисправности (1 символ);
- группу сложности неисправности (1 символ);
- выполненную работу (2 символа);
- характер установленного изделия (1 символ);
- завод, страна-изготовитель (2 символа).

В настоящее время для идентификации отказов в автомобилестроении нашла широкое применение система OBD (от англ. «on-board diagnostic»).

По сути OBD-2 – это технология выявления неисправности автомобиля или его отдельного блока с помощью диагностирующего устройства. Система считывает и накапливает необходимую информацию о работе всех автомобильных систем¹. Пример кода с расшифровкой представлен на рис. 6.

Еще одним документом, описывающим кодификатор отказов, является РД 39-139-95 «Инструкция по расследованию и учету нарушений в работе объектов энергетического хозяйства предприятий и организаций нефтяной промышленности».

¹ Что такое OBD II? <https://www.autoscaners.ru/articles/what-is-obd-ii/>

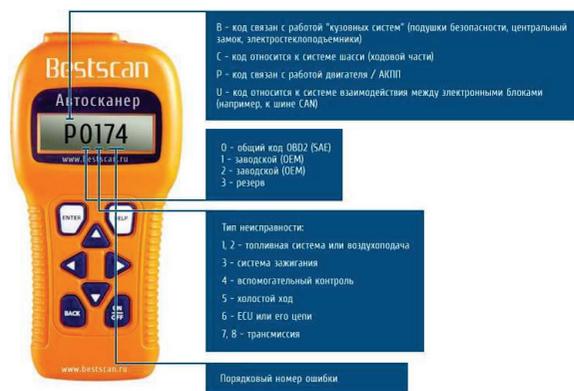


Рис. 6. Система OBD-2

Кодификатор является цифровым и содержит следующие классификаторы:

- классификатор электроустановок, где произошел отказ;
- классификатор элемента оборудования/сооружения;
- классификатор напряжений;
- классификатор характера отказа;
- классификатор отказавших узлов оборудования/сооружения;
- классификатор причины возникновения отказа;
- классификатор по вине персонала;

Все коды каждого классификатора являются двух-символьными.

В вагоностроении в 1986 году был разработан РТМ № 72-ЦЛЭ «Нормируемые показатели надежности пассажирских вагонов локомотивной тяги», который также включал классификатор неисправностей. Классификатор был составлен по принципу влияния отказавшего элемента на высшую сборочную единицу: элемент – узел – агрегат – система – вагон. Также учитывалось то, что элемент мог быть заменен или отремонтирован.

Еще одним примером является перечень неисправностей грузовых вагонов согласно РД 32 ЦВ 094-2010.

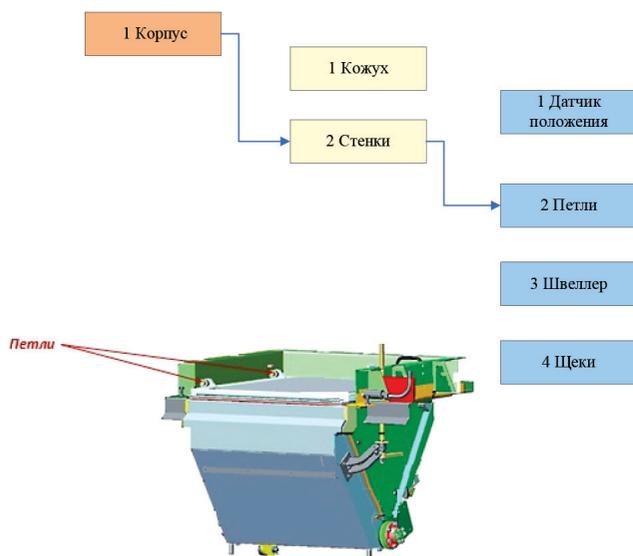


Рис. 7. Кодификация неисправности на примере поворотной подножки

Неисправность описывается трехзначным цифровым кодом (например, 553 – Повреждение (обрыв) лестниц, поручней, подножек). Помимо этого, представлен перечень основных типов ремонтных работ. Он представляет из себя пятизначный цифровой код, где цифры разделены точками согласно основным узлам конструкции грузовых вагонов (например, 5.1.2.12 – ремонт сварной планки с отверстиями для открытия двери).

Рассмотрим модель кодификатора отказов компонентов пассажирского вагона на примере подножки ФКГП 280.00.00.000. Поворотная подножка предназначена для удобного и безопасного прохода пассажиров, возможности посадки в вагон с земли и с высоких, и низких платформ [8]. Поворотные подножки устанавливаются на модели вагонов 61-4458, 61-4440, 61-4447 и др.

Для кодификации отказов подножек предлагается использовать буквенно-численный кодификатор, который будет включать:

1. Наименование изделия (код буквенный – сокращение от английского наименования изделия).
2. Шифр согласно конструкторской документации (код трехсимвольных числовой).
3. Причина отказа (код числовой).
4. Отказавший элемент (код трехсимвольный числовой).
5. Описание отказа (код двухсимвольный числовой).

Выделим основные причины отказа и пронумеруем их в следующем порядке:

- 1 – нарушение руководства по эксплуатации обслуживающим персоналом;
- 2 – внешние воздействующие факторы, непредусмотренные техническими условиями;
- 3 – конструкция;
- 4 – монтаж;
- 5 – зависимый отказ (следствие другого отказа).

Пример кода неисправности представлен на рис. 7. Здесь отказавший элемент – это петли корпуса поворотной подножки.



4. Гарантийный парк

Для проведения оценки показателей надежности изделий в эксплуатации в гарантийный период необходимо знать точное количество изделий, которые находятся на гарантийном обслуживании. Это особенно важно при производстве большой номенклатуры изделий с разными гарантийными обязательствами.

На первом этапе требуется определить количество выпущенной продукции за конкретный период Δt . Алгоритм расчета гарантийного парка заключается в следующем соотношении:

$$N_i(t + \Delta t) = N_i(t) + N_i(\Delta t) - N_i(\Delta t, g_i), \quad (1)$$

где $N_i(t)$ – количество i -го типа изделий на гарантии к моменту времени t ;

$N_i(\Delta t)$ – количество i -го типа изделий, выпущенных за время Δt ;

$N_i(\Delta t, g_i)$ – количество i -го типа изделий, выпущенных за тот же промежуток Δt , начало которого отстоит от $N_i(t)$ на величину гарантийного срока g_i изделия i .

Оценки средней наработки между отказами необходимо производить для каждого изделия $i, i = 1, 3$ для 4-х временных интервалов:

- прошедший промежуток Δt текущего года j ;
- тот же промежуток Δt предшествующего года $j - 1$;
- промежуток от начала исчисления t_0 до момента времени $t + \Delta t$ текущего года j ;
- промежуток от начала исчисления t_0 до момента времени $t + \Delta t$ предшествующего года $j - 1$.

Рассмотрим процесс оценки показателей безотказности с учетом четырех временных интервалов на примере автоматических дверей пассажирских вагонов локомотивной тяги. Для каждого из интервалов времени требуется:

- определение количества отказов;
- определение гарантийного парка (ГП);
- определение времени наработки;
- нахождение точечных оценок;
- нахождение интервальных оценок;
- сравнение полученных интервальных оценок показателей безотказности с нормируемыми.

1) Обозначим количество отказов следующим образом – 4 значения для изделия $i, i = 1, 3$:

$f_{i,j-1}(\Delta t)$ – количество отказов за промежуток Δt предыдущего года $j - 1$;

$f_{i,j}(\Delta t)$ – количество отказов за промежуток Δt текущего года j ;

$f_{i,j}(t + \Delta t, t_0)$ – количество отказов с момента t_0 к моменту времени $t + \Delta t$ предыдущего года $j - 1$;

$f_{i,j}(t + \Delta t, t_0)$ – количество отказов с момента t_0 к моменту времени $t + \Delta t$ текущего года j .

2) Определим значения ГП по (1). Для этого требуется по два значения для каждого изделия $i, i = 1, 3$:

$N_{i,j-1}(t + \Delta t)$ – ГП на конец того же отчетного периода Δt предыдущего года $j - 1$;

$N_{i,j}(t + \Delta t)$ – ГП на конец отчетного периода текущего года j (заметим, что $N_{i,j-1}(t + \Delta t) = N_{i,j-1}(t + \Delta t, t_0)$ и $N_{i,j}(t + \Delta t) = N_{i,j}(t + \Delta t, t_0)$).

3) В соответствии с тем, что расчет осуществляется для 4-х промежутков времени, в качестве исходных данных также необходимы значения 4-х наработок, выраженных в сутках:

$T_{j-1}(\Delta t)$ – наработка за промежуток Δt предыдущего года $j - 1$;

$T_j(\Delta t)$ – наработка за тот же промежуток Δt текущего года j ;

$T_{j-1}(t + \Delta t, t_0)$ – наработка на момент времени $t + \Delta t$, исчисление которой началось в момент времени t_0 предыдущего года $j - 1$;

$T_j(t + \Delta t, t_0)$ – наработка на момент времени $t + \Delta t$, исчисление которой началось в момент времени t_0 текущего года j .

Данные значения наработок будут одними из исходных данных для вычисления точечных оценок средней наработки между отказами.

Так как все $i, i = 1, 3$, изделий, для которых производится расчет, являются сложными и включают в себя большую группу различных элементов, в рассматриваемой методике принято допущение об аппроксимации распределения значений параметров «наработка на отказ» экспоненциальным распределением.

В соответствии с рекомендациями методических указаний РД 50-690-89 принимается план испытаний [NMT_Σ] для оценки средней наработки на отказ.

Вследствие предположения об экспоненциальном законе распределения, точечные оценки средней наработки на отказ i -го изделия, $i = 1, 3$, в соответствии с исходными данными, указанными в пунктах 1)-3) вычисляются по формулам:

$$T_{i,j-1}^0(\Delta t) = \frac{T_{j-1}(\Delta t) \cdot N_{i,j-1}(t + \Delta t) \cdot t_i^{\text{сут}}}{f_{i,j-1}(\Delta t)}, \quad (2)$$

$$T_{i,j}^0(\Delta t) = \frac{T_j(\Delta t) \cdot N_{i,j}(t + \Delta t) \cdot t_i^{\text{сут}}}{f_{i,j}(\Delta t)}, \quad (3)$$

$$T_{i,j-1}^0(t + \Delta t, t_0) = \frac{T_{j-1}(t + \Delta t, t_0) \cdot N_{i,j-1}(t + \Delta t) \cdot t_i^{\text{сут}}}{f_{i,j-1}(t + \Delta t, t_0)}, \quad (4)$$

$$T_{i,j}^0(t + \Delta t, t_0) = \frac{T_j(t + \Delta t, t_0) \cdot N_{i,j}(t + \Delta t) \cdot t_i^{\text{сут}}}{f_{i,j}(t + \Delta t, t_0)}, \quad (5)$$

где $t_i^{\text{сут}}$ – среднесуточный пробег вагона, на котором установлено i -е изделие, $i = 1, 3$, км/сутки.

По найденным точечным оценкам (2)-(5) и значениям количества отказов в различные промежутки времени из пункта 1), находим величины нижних доверительных границ (так как средняя наработка на отказ – позитивный показатель надежности) уровня доверия $q = 0,9$:

$$T_{i,j-1}^{0H}(\Delta t) = T_{i,j-1}^0(\Delta t) \cdot \frac{2 \cdot f_{i,j-1}(\Delta t)}{\chi_q^2(2 \cdot f_{i,j-1}(\Delta t) + 2)}, \quad (6)$$

$$T_{i,j}^{0H}(\Delta t) = T_{i,j}^0(\Delta t) \cdot \frac{2 \cdot f_{i,j}(\Delta t)}{\chi_q^2(2 \cdot f_{i,j}(\Delta t) + 2)}, \quad (7)$$

$$T_{i,j-1}^{0H}(t+\Delta t, t_0) = T_{i,j-1}^0(t+\Delta t, t_0) \cdot \frac{2 \cdot f_{i,j-1}(t+\Delta t, t_0)}{\chi_q^2(2 \cdot f_{i,j-1}(t+\Delta t, t_0) + 2)}, \quad (8)$$

$$T_{i,j}^{0H}(t+\Delta t, t_0) = T_{i,j}^0(t+\Delta t, t_0) \cdot \frac{2 \cdot f_{i,j}(t+\Delta t, t_0)}{\chi_q^2(2 \cdot f_{i,j}(t+\Delta t, t_0) + 2)}, \quad (9)$$

где $\chi_q^2(\cdot)$ – квантили распределения χ^2 с уровнем доверия $q = 0,9$.

На последнем этапе полученные в соответствии с (6)–(9) значения нижних доверительных границ средних наработок на отказ сравниваются с нормируемыми показателями надежности $T_i^{\text{ТУ}}$ для каждого изделия $i, i = 1, 3$ и делаются выводы о соответствии/несоответствии фактических показателей надежности требованиям технической документации.

Заключение

В статье представлены особенности и методы анализа на этапах сбора, обработки и анализа статистических данных об отказах в процессе эксплуатации, рассмотрен алгоритм учета отказов изделий по входящим документам на примере предприятия-поставщика компонентов подвижного состава для вагоностроительных заводов, проведен обзор известных кодификаторов отказов и предложен вариант кодификатора, учитывающий особенности структурной взаимосвязи компонентов пассажирских вагонов, а также представлена методика учета и ведения гарантийного парка для последующего формирования суммарной наработки, учет которой необходим в процессе расчета показателей надежности изделий в процессе эксплуатации.

Каждый из рассмотренных в данной работе этапов является важным для всего цикла анализа и управления надежностью. Помимо этого, все рассмотренные темы неразрывно связаны между собой и являются последовательными в процессе анализа. Качественный сбор данных об отказах позволяет обеспечить полноту выборки эксплуатационной информации, необходимой для всех инструментов, применяемых в теории надежности. Этап обработки полученных данных позволяет классифицировать информацию, очистить данные в зависимости от специфики и целей дальнейшего анализа. Учет гарантийного парка необходим для корректного определения суммарной наработки для различных временных интервалов, что является важным шагом перед количественной оценкой показателей надежности. Все аспекты реализации и прикладные инструменты, необходимые для проведения данных этапов, приведены в данной работе по результатам анализа и решения актуальных прикладных задач надежности на предприятиях-производителях.

Список литературы

1. Белоусова М.В., Булатов В.В. Автоматизированная система ввода данных о выполненных работах по гарантийным обязательствам // В сборнике: Завалишинские чтения 19. XIV Международная конференция по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, (17–20 апреля 2019 года). 2019. С. 135-140.
2. Жаднов В.В., Кулыгин В.Н., Куриленков А.Н. Интеграция программы Windchill Prediction и системы расчета надежности электронных модулей АСОНИКА-К-СЧ // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2016. № 19. С. 207-212.
3. Сопин А.Э. Обзор систем управления основными фондами промышленных предприятий для технического обслуживания и ремонта // Решетневские чтения. 2018. Т. 2. С. 304-305.
4. Булатов В.В. Особенности учета отказов технических систем в 1С: ТОИР // В сборнике: Завалишинские чтения 21. XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, (15–18 апреля 2021 года). 2021. С. 193-197.
5. Булатов В.В., Назаренко Ф.А., Белоусова М.В. Автоматизированная система ввода данных о выполненных работах по гарантийным обязательствам // В сборнике: Завалишинские чтения 20. XV Международная конференция по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, (15–18 апреля 2020 года). 2020. С. 186-188.
6. Булатов В.В., Назаренко Ф.А., Солёный С.В. и др. Программа ввода данных о выполненных работах по гарантийным обязательствам. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020611673, 06.02.2020. Заявка № 2020610856 от 31.01.2020.
7. Булатов В.В., Владимиров Р.А. Система сбора данных о неисправностях технических систем // В сборнике: Завалишинские чтения 23. Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике Санкт-Петербург, (18–19 апреля 2023 года). Санкт-Петербург, 2023. С. 190-193.
8. Белоусова М.В., Булатов В.В. Оценка средней наработки до отказа поворотных подножек по данным эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78. № 1. С. 54-58. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-1-54-58

References

1. Belousova M.V., Bulatov V.V. [Automated data entry system of the work performed under warranty]. In: XIV International Electromechanics and Robotics Conference Zavalishin Readings 19. April 17-20, 2019. Pp. 135-140. (in Russ.)
2. Zhadnov V.V., Kulygin V.N., Kurilenkov A.N. [Integration of Windchill Prediction and the АSONIKA-K-SCh electronic module dependability calculation system]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* 2016;19:207-212. (in Russ.)

3. Sopin A.E. [A review of fixed assets management systems for maintenance and repair in industrial companies]. *Reshetnev Readings* 2018;2:304-305. (in Russ.)

4. Bulatov V.V. [Specificity of technical failure recording in 1C: TOIR]. In: XVI International Electromechanics and Robotics Conference Zavalishin Readings 21. April 15-18, 2021. Pp. 193-197. (in Russ.)

5. Bulatov V.V., Nazarenko F.A., Belousova M.V. [Automated system for entering data on delivered warranty activities]. In: Proceedings of the XV International Electromechanics and Robotics Conference Zavalishin Readings 20. April 15-18, 2020. Pp. 186-188. (in Russ.)

6. Bulatov V.V., Nazarenko F.A., Soleny S.V. et al. [A program for entering data on delivered warranty activities]. Certificate of software registration RU 2020611673, 02.06.2020. Application No. 2020610856 dated 31.01.2020.

7. Bulatov V.V., Vladimirov R.A. [System for collecting data on malfunctions of technological systems]. In: Proceedings of the XVIII International Electromechanics and Robotics Conference Zavalishin Readings 23. April 18-19, 2023. Pp. 190-193. (in Russ.)

8. Belousova M.V., Bulatov V.V. Estimation of the average time to failure of the turning steps according to the operation data. *RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL* 2019;78(1):54-58. (in Russ.) <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-54-58>.

Сведения об авторах

Мария В. Белоусова, кандидат физико-математических наук, старший аналитик данных, ООО «ПРОЦифру», Российская Федерация, Санкт-Петербург, e-mail: 27bmw1993@mail.ru

Виталий В. Булатов, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Российская Федерация, Санкт-Петербург, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

About the authors

Maria V. Belousova, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Data Analyst, ООО PROTsifru, Russian Federation, Saint Petersburg, e-mail: 27bmw1993@mail.ru

Vitaly V. Bulatov, Candidate of Engineering, Senior Lecturer in Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russian Federation, Saint Petersburg, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

Вклад авторов в статью

Белоусова М.В. Разработала методику учета гарантийного парка для компонентов пассажирских вагонов, провела анализ существующих кодификаторов отказов и предложила модель кодификатора отказов для компонентов подвижного состава.

Булатов В.В. Разработал алгоритм учета отказов компонентов пассажирских вагонов, осуществил обзор существующих программных решений для учета отказов и существующих методов кодификации отказов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Интеллектуальная система анализа и классификации генераторов псевдослучайных чисел

Intelligent system for analysing and classifying pseudorandom number generators

Автоношкин А.М.¹, Куминов В.П.^{1*}, Сидоренко В.Г.¹, Смецкая А.С.¹
Avtonoshkin A.M.¹, Kuminov V.P.^{1*}, Sidorenko V.G.¹, Smetskaya A.S.¹

¹ РУТ(МИИТ), Российская Федерация, Москва

¹ RUT(MIIT), Russian Federation, Moscow

*1036301@edu.rut-miit.ru



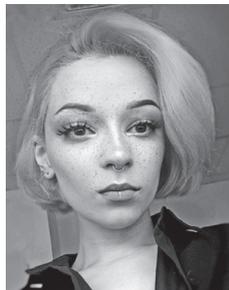
Автоношкин А.М.



Куминов В.П.



Сидоренко В.Г.



Смецкая А.С.

Резюме. Цель. Настоящая работа посвящена рассмотрению вопросов построения интеллектуальной системы анализа и классификации генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ), объединяющей возможности машинного обучения и направленного перебора для решения задачи определения типа источника случайной последовательности чисел. Основное внимание уделяется выявлению слабостей некриптографических ГПСЧ, которые могут быть предсказуемыми, что несет риски для их использования в области информационной безопасности. **Методы.** В ходе исследования использовались методы машинного обучения, в частности нейронные сети, корреляционный анализ и статистические тесты NIST. Разработанные модели обучались на больших выборках выходных последовательностей ГПСЧ, что позволило оценить предсказуемость ГПСЧ и возможность восстановления внутренних состояний. Структура нейронных сетей выбиралась с учетом результатов работы процедур оптимизации значений гиперпараметров нейронных сетей. Показано влияние размера выборки на получаемые результаты. **Результаты.** Анализ и классификация ГПСЧ включает несколько этапов: вычисление автокорреляционной функции выходных последовательностей и их спектр, выполнение статистических тестов, разработанных лабораторией NIST; классификация ГПСЧ на основе анализа выходных последовательностей; выявление особенностей внутренней структуры ГПСЧ или его внутренних состояний; прогнозирование значений на выходе. Для алгоритма Xorshift128 нейронная сеть показала высокую точность восстановления выходных значений, подтверждая его уязвимость. Анализ алгоритма Mersenne Twister выявил определенные закономерности, но потребовал более сложных архитектур для полной реконструкции последовательностей. Для алгоритма «стоп-пошел» удалось выявить закономерности построения структуры с использованием алгоритмов машинного обучения, но решить задачу прогнозирования значения на выходе ГПСЧ только по предыдущим значениям выходной последовательности без знания внутренних состояний с высокой точностью не удалось. Линейный конгруэнтный генератор и генератор Гейффе удается классифицировать и прогнозировать с использованием алгоритмов направленного перебора. Объединенные в систему модели классифицируют ГПСЧ по их характеристикам и прогнозируют их дальнейшие выходные значения. Анализ полученных результатов подтверждает значимость выбора не только структуры ГПСЧ, но и числовых параметров и задействованных в вычислениях битов внутри чисел. **Заключение.** Проведенное исследование подтверждает эффективность сочетания методов машинного обучения и направленного перебора при анализе и классификации ГПСЧ. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную систему для использования в практических задачах оценки безопасности ГПСЧ. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением множества анализируемых ГПСЧ и рассмотрением других типов нейронных сетей для повышения качества и производительности моделей.

Abstract. Aim. This paper examines the construction of an intelligent system for analysing and classifying pseudorandom number generators (PRNGs) that combines the capabilities of machine learning and directed search for determining the type of the source of a random sequence of numbers. The focus is on identifying weaknesses in non-cryptographic PRNGs that may be predictable, which entails risks for their use in information security. **Methods.** The research used machine learning methods, including neural networks, correlation analysis, and NIST statistical tests. The developed models were trained on large samples of PRNG output strings, which allowed estimating the predictability of the PRNG and internal state restorability. Neural network structures were chosen taking into account the results of optimisation of the neural network hyperparameter values. The paper shows the effect of the sample size on the obtained results. **Results.** The analysis and classification of a PRNG involves a number

of steps: calculating the autocorrelation function of the output strings and their spectrum; execution of statistical tests developed by the NIST laboratory; classification of PRNGs based on the output strings analysis; identifying the specificity of the PRNG's internal structure or its internal states; prediction of the output values. For the Xorshift128 algorithm, the neural network showed a high accuracy of output value restoration, which confirms its vulnerability. An analysis of the Mersenne Twister algorithm revealed certain patterns, but required more complex architectures to completely reconstruct the strings. Using machine learning algorithms, the authors managed to identify the structure building patterns for the "stop-and-go" algorithm, but failed to highly accurately predict the PRNG output value based only on the prior output string values with no knowledge of the internal states. Directed search algorithms allow classifying and predicting a linear congruential generator and a Geffe generator. The models combined into a system classify PRNGs according to their characteristics and predict their eventual output values. An analysis of the obtained results confirms the significance of not only the selected PRNG structure, but also the numerical parameters and the bits within numbers involved in the computation. **Conclusion.** The conducted study confirms the efficiency of the combination of machine learning and directed search as part of the analysis and classification of PRNGs. The findings allow recommending the developed system for use in practical PRNG safety assessment. Further research will focus on expanding the set of analysed PRNGs and examining other types of neural networks for improving the quality and performance of models.

Ключевые слова: генератор псевдослучайных чисел, классификация, прогнозирование последовательностей, машинное обучение, информационная безопасность.

Keywords: pseudorandom number generator, classification, string prediction, machine learning, information security.

Для цитирования: Автоношкин А.М., Куминов В.П., Сидоренко В.Г., Сметцкая А.С. Интеллектуальная система анализа и классификации генераторов псевдослучайных чисел // Надежность. 2025. №3. С. 21-28. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-21-28>

For citation: Avtonoshkin A.M., Kuminov V.P., Sidorenko V.G., Smetskaya A.S. Intelligent system for analysing and classifying pseudorandom number generators. Dependability 2025;3: 21-28. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-21-28>

Поступила: 08.03.2025 / **После доработки:** 14.05.2025 / **К печати:** 25.07.2025

Received on: 08.03.2025 / **Revised on:** 14.05.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Введение

Генераторы псевдослучайных чисел (ГПСЧ) используются в различных областях, от лотерей до криптографии. Предсказуемость таких генераторов может привести к серьезным последствиям, таким как снижение точности вычислений и утечка данных, например, при компрометации ключей шифрования или параметров стеганографических алгоритмов [1]. Проблема усугубляется тем, что по незнанию или ошибке вместо генераторов истинно случайных чисел, порождаемых природными процессами, могут использоваться ГПСЧ. Актуальность данной работы обуславливается необходимостью освещения проблем использования ГПСЧ и сложностью их классификации [2].

Аналізу безопасности ГПСЧ посвящено большое число публикаций.

В продолжение цикла исследований и публикаций на тему анализа ГПСЧ и их классификации авторами была выдвинута идея создания интеллектуальной системы, предназначенной для классификации, а в некоторых случаях и для прогнозирования поведения таких генераторов [3-4].

Цель данной статьи – создание интеллектуальной системы анализа и классификации генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ), объединяющей возможности

машинного обучения и направленного перебора для решения задачи определения типа источника случайной последовательности чисел. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи анализа и классификации ГПСЧ: анализ уязвимостей ГПСЧ, анализ автокорреляционных функций выходных последовательностей ГПСЧ и их спектров, анализ результатов выполнения статистических тестов, разработанных лабораторией NIST; классификация ГПСЧ на основе анализа выходных последовательностей; выявление особенностей внутренней структуры ГПСЧ или его внутренних состояний; прогнозирование значений на выходе.

1. Слабости ГПСЧ

ГПСЧ имеют ряд существенных слабостей. Примеры таких слабостей, отражены в *Common Weakness Enumeration (CWE)* [5]. Системы машинного обучения (МО) с высокой точностью могут прогнозировать значения на выходе ГПСЧ, если они зависят от предыдущих выходных значений. Эта проблема зафиксирована, например, в следующих элементах CWE:

- CWE-340: проблемы прогнозируемости;
- CWE-341: прогнозируемость по наблюдаемому состоянию;

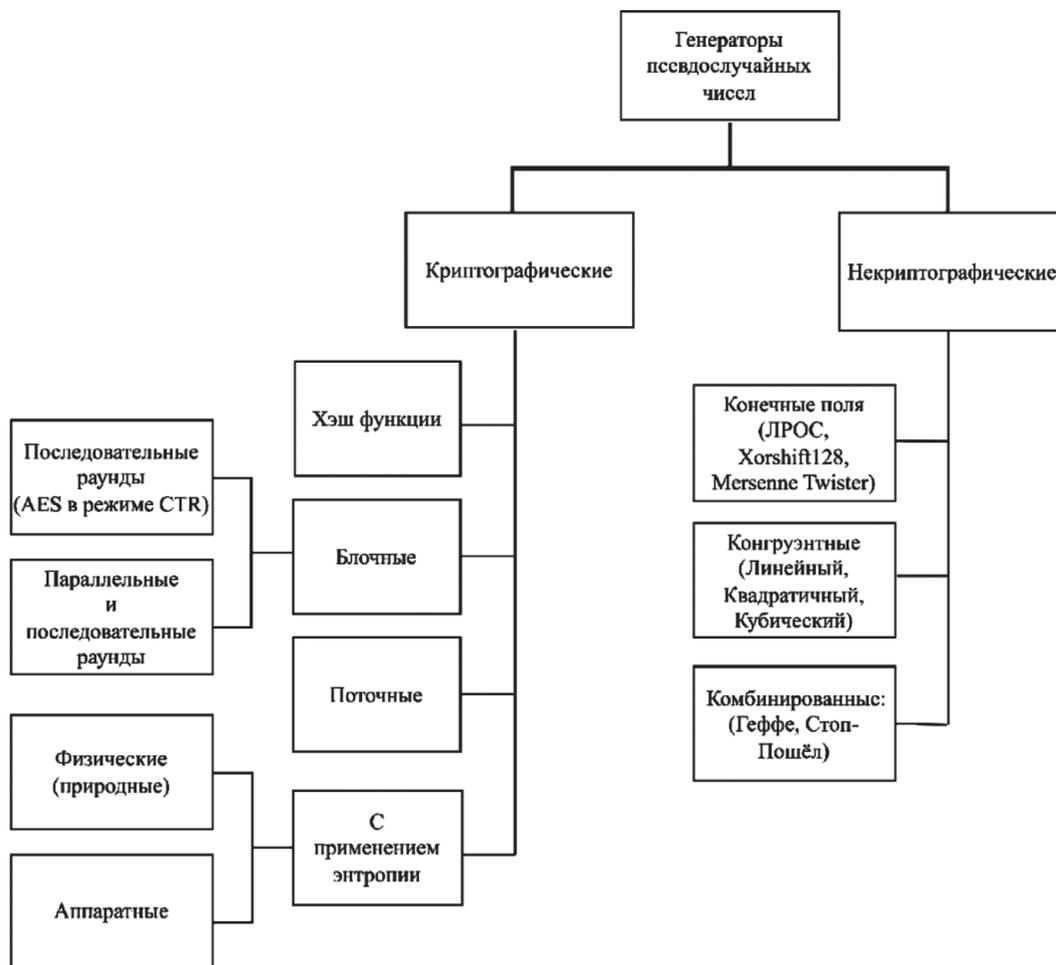


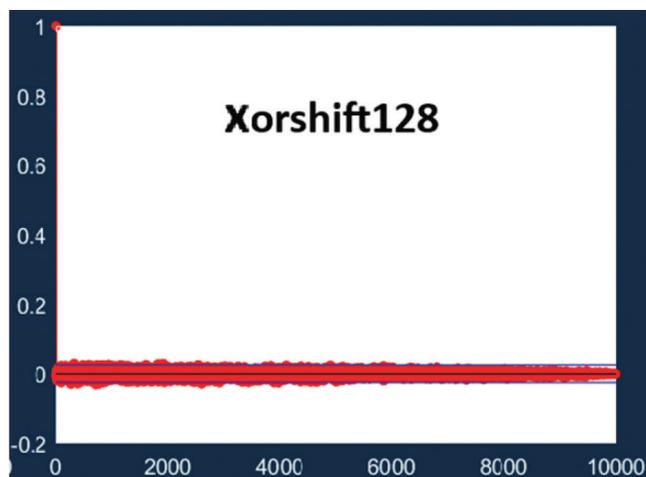
Рис. 1. Классификация ГПСЧ

– *CWE-342*: прогнозирование точного значения по предыдущим значениям;

– *CWE-343*: прогнозирование диапазона значений по предыдущим значениям.

ГПСЧ можно разделить на криптографические и некриптографические (рис. 1). Поскольку криптографиче-

ские ГПСЧ защищены от прогнозирования [4], в данном исследовании акцент сделан на некриптографических ГПСЧ. Непредсказуемость криптографических ГПСЧ может быть пересмотрена в будущем в условиях наращивания вычислительных ресурсов и развития новых технологий.



а)



б)

Рис. 2. Автокорреляционные функции выходных последовательностей ГПСЧ Xorshift128 (а) и ЛКГ Парка-Миллера (б)

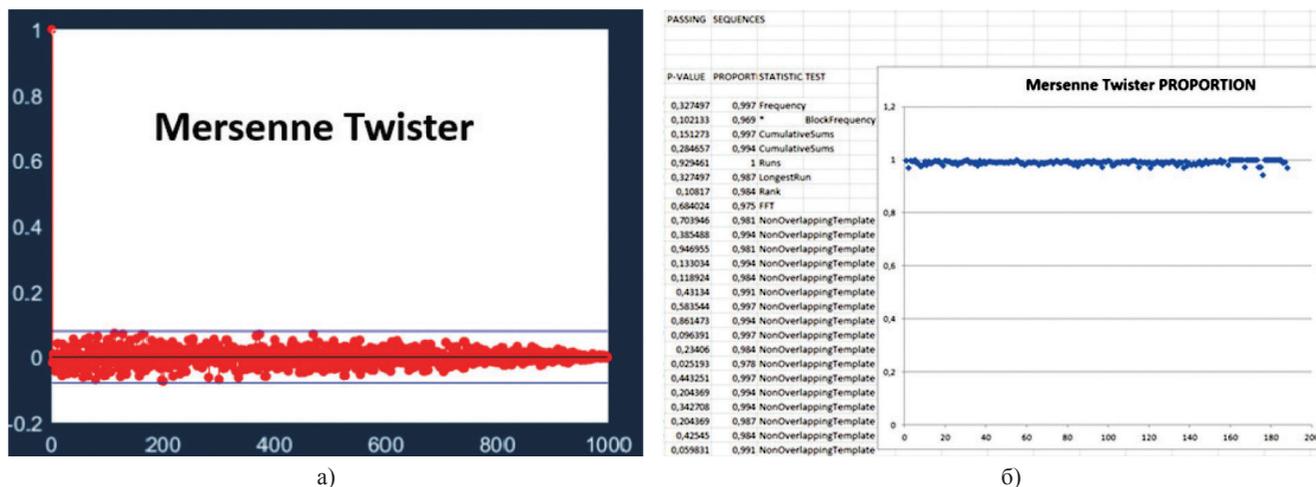


Рис. 3. Автокорреляционная функция выходной последовательности (а) и результаты тестов *NIST* для ГПСЧ Mersenne Twister (б)

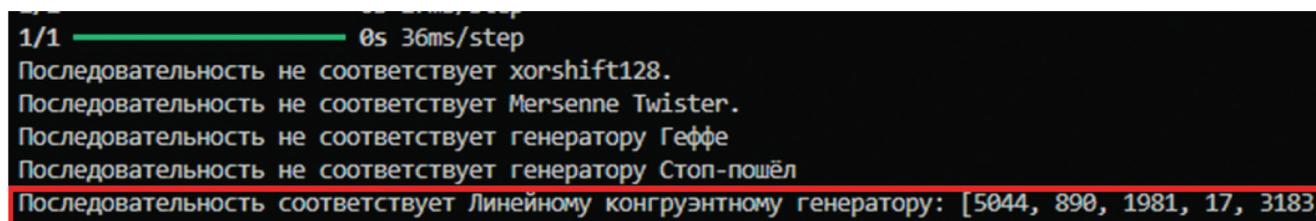


Рис. 4. Результаты работы систем по классификации ГПСЧ

2. Анализ выходных последовательностей ГПСЧ

Анализ выходных последовательностей ГПСЧ проводится разными способами:

- вычисление автокорреляционной функции выходных последовательностей и их спектра. Например, быстро убывающая, без всплесков автокорреляционная функция указывает на высокое качество рассмотренных алгоритмов Xorshift128 (рис. 2а) и Mersenne Twister (рис. 3а). Имеющая всплески автокорреляционная функция линейного конгруэнтного генератора (ЛКГ) Парка-Миллера, напротив, указывает на его непригодность для применения в задачах с высокими требованиями к случайности (рис. 2б);

- выполнение статистических тестов, разработанных лабораторией *NIST*. Как правило, результаты тестов *NIST* для классических алгоритмов ГПСЧ с правильно подобранными параметрами подтверждают хорошее качество алгоритмов с небольшими погрешностями, однако, как показали дальнейшие исследования, результаты работы этих алгоритмов могут быть спрогнозированы нейронными сетями (НС) или раскрыты путем направленного перебора и уже не могут считаться достаточно безопасными для использования. Например, проведенные для генератора Mersenne Twister тесты показали его хорошее качество, выявив небольшие слабости при генерации отдельных шаблонов и указывая на возможные скрытые закономерности, например, тест неперекрывающихся шаблонов показал слабости в генерации отдельных паттернов (рис. 3б).

3. Определение типа ГПСЧ – источника случайной последовательности чисел

В ходе выполненных исследований были разработаны НС и алгоритмы направленного перебора, объединенные в систему и отвечающие на вопрос: является ли последовательность, поданная на вход системы, выходной последовательностью ГПСЧ, соответствующего данной НС или алгоритму. Для каждого из рассмотренных ГПСЧ был разработан собственный алгоритм. В ходе проведенных экспериментов не было зафиксировано ошибок в классификации (рис. 4).

Анализ работы алгоритма Xorshift128 показал, что только два предыдущих значения выходной последовательности участвуют в генерации текущего (первого с конца последовательности): 2-е и 5-е с конца последовательности (рис. 5). Во входном слое построенной НС, которая прогнозирует следующее значение выходной последовательности, 64 узла, соответствующих двум значениям выходной последовательности, у каждого из которых длина 32 бита. В скрытом слое 1024 узла. Такое число узлов является компромиссным: достаточным для распознавания шаблонов нелинейной операции XOR, но не приводящим к переобучению. В выходном слое 32 узла, описывающих 32 разряда выходного числа. Если прогнозируемое значение на выходе НС совпадает с известным заключительным числом последовательности, то считаем, что поданная последовательность является выходной для ГПСЧ Xorshift128.

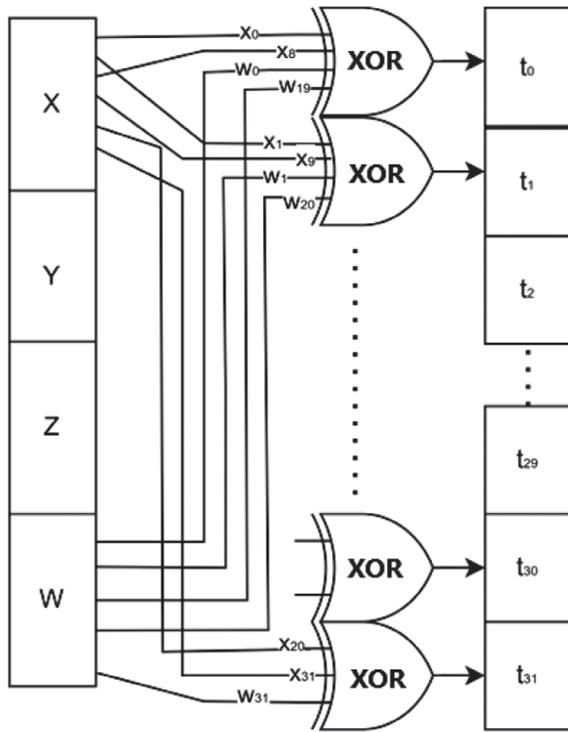


Рис. 5. Структурная схема ГПСЧ Xorshift128 [4]

В разработанной системе рассмотрен ГПСЧ *Mersenne Twister*, более сложный, чем Xorshift128, и используемый в текущих реалиях. Он также основан на операциях сдвигах и исключающего ИЛИ (XOR), но уже имеет блок внутреннего состояния из 624-х внутренних значений и блок преобразования, усложняющий восстановление скрытых процессов работы генератора (рис. 6) [6]. В связи с этим задача классификации решалась за три шага (см. рис. 6):

- восстановление внутреннего состояния. Несмотря на необратимость с точки зрения традиционных методов, связанную с использованием операции XOR, НС

с одним скрытым слоем из 800 узлов, реализующая это восстановление, не допустила ошибок в процессе тестирования. На вход подавалось число в бинарном 32-битном виде после преобразования, на выходе ожидалось число до преобразования;

- моделирование основного блока. Поскольку известно, что каждое новое состояние зависит от трех предыдущих, а именно 1-го, 2-го и 398-го, то для решения этой задачи была построена НС, на вход которой подается три 32-битных числа, а на выходе получается одно 32-битное число;

- повторная модификация, преобразующая результат моделирования внутреннего блока в результат выполнения операции Xorshifter.

В случае ГПСЧ «стоп-пошел», как и в случае ГПСЧ Mersenne Twister, зная его внутренние состояния, удалось с использованием НС спрогнозировать значение на выходе ГПСЧ, но зная только предыдущие значения на выходе, не удастся прогнозировать внутренние состояния и значения на выходе. Это подтверждает то, что алгоритм «стоп-пошел» обладает большей непредсказуемостью. НС, позволяющие выявить особенности внутренней структуры ГПСЧ, о чем будет рассказано ниже, помогли задать направление перебора. Удалось выяснить, что для классификации необходимо только 3 бита от каждого из линейных регистров с обратной связью (ЛРОС), которые участвуют в организации обратных связей соответствующего ЛРОС (рис. 7).

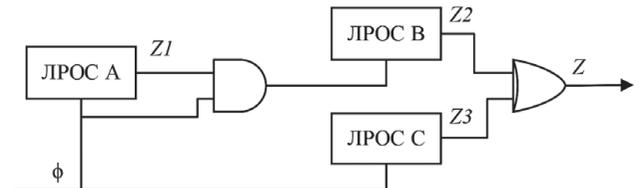
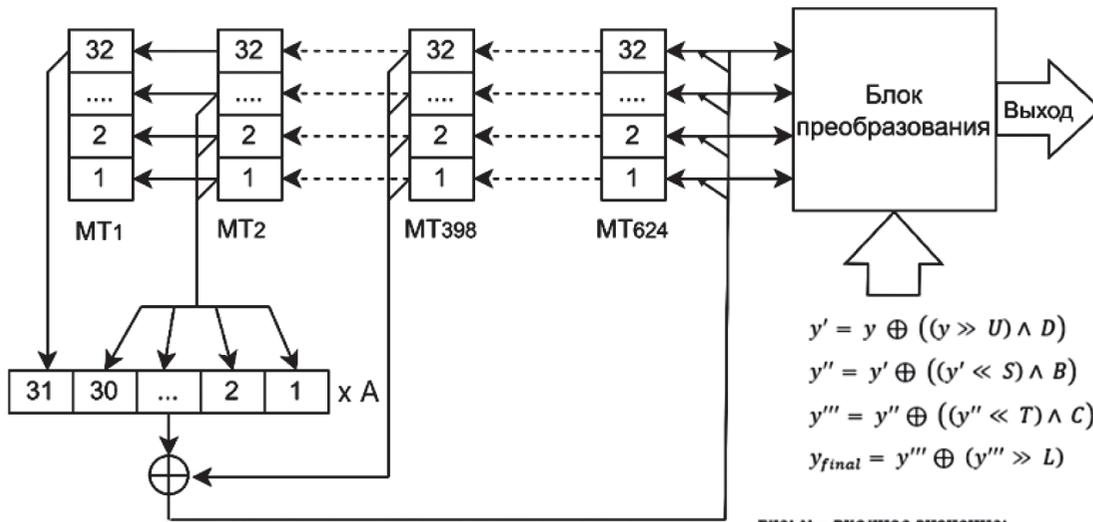


Рис. 7. Генератор «стоп-пошел»



где: y – входное значение;

U, S, T, L, D, B, C – константы сдвига и маскирования.

Рис. 6. Структурная схема ГПСЧ Mersenne Twister 1997 [6]

Для ЛКГ и нелинейных конгруэнтных генераторов в связи с использованием в них операций определения остатка от деления не удалось построить НС, точность прогнозирования в которых превышала бы 70%. Поэтому для их классификации в системе используются алгоритмы направленного перебора.

4. Выявление особенностей внутренней структуры ГПСЧ или его внутренних состояний

Особенность алгоритма Xorshift128, заключающаяся в зависимости текущего выходного значения (первого с конца последовательности) от 2-го и 5-го чисел с конца последовательности была выявлена заранее и учтена при построении НС, используемой для классификации ГПСЧ и прогнозирования выходного значения.

Представленный на рис. 8 график соединения узлов скрытого слоя НС, построенной для восстановления внутреннего состояния ГПСЧ Mersenne Twister, с узлами входного слоя наглядно демонстрирует работу алгоритма согласно рис. 6. Узлы с первого по тридцать второй оказались «мертвыми», то есть неиспользуемыми. Это говорит о том, что модель МО успешно нашла зависимости, не зная о них: в генерации нового значения принимают участие только старший бит первого числа, все, кроме старшего, биты второго числа и 398 число.

Определить внутренние зависимости для ГПСЧ, не всегда удается. Для примера рассмотрим упрощенную версию ГПСЧ «стоп-пошел». Пусть значение на выходе генератора Z определяется по формуле:

$$Z = ((Z1 \wedge Z2) XOR (\overline{Z1} \wedge Z3)),$$

где $Z1$ – значение на выходе ЛРОС А, $Z2$ – значение на выходе ЛРОС В, $Z3$ – значение на выходе ЛРОС С.

Если длины регистров В, С и А равны 8, 10 и 22 разряда, соответственно, то, как показано на рис. 9а, наличие обратных связей определилось только для регистров С (для 6-го, 7-го и 10-го разрядов) и А (для 11-го, 16-го и 22-го разрядов).

Если длины регистров В, С и А равны 16, 8 и 16 разрядов, соответственно, то, как показано на рис. 9б, наличие обратных связей определилось для всех трех регистров: С (для 4-го, 5-го и 8-го разрядов), А (для 5-го, 10-го и 16-го разрядов) и В (для 9-го, 15-го и 16-го разрядов). Как и в случае анализа автокорреляционных функций это подтверждает значимость не только выbranного типа структуры ГПСЧ, но и используемых числовых параметров и задействованных в вычислениях битов внутри чисел.

Параметры ЛКГ удается определить с использованием направленного перебора, имея два последовательных значения на выходе генератора. Для нелинейных конгруэнтных генераторов существуют теоретические предположки для создания систем определения параметров.

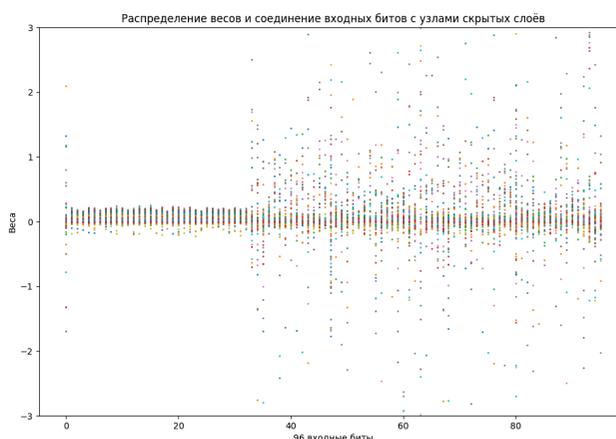


Рис. 8. Веса входных битов на входах узлов скрытого слоя НС моделирования основного блока ГПСЧ Mersenne Twister

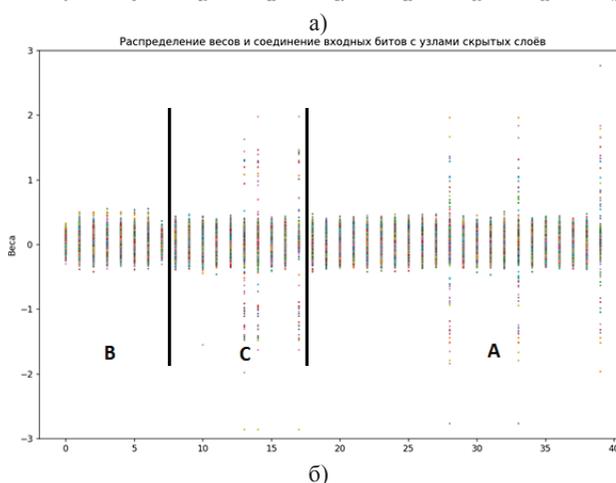
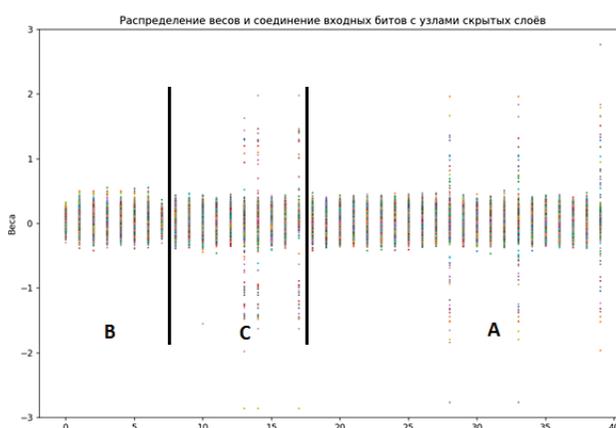


Рис. 9. Веса входных битов на входах узлов скрытого слоя НС определения внутренней структуры ГПСЧ «стоп-пошел» при длинах регистров В, С и А 8, 10 и 22 разрядов, (а) и 16, 8 и 16 разрядов (б), соответственно

Решение задачи определения типа ГПСЧ не всегда означает возможность прогнозирования следующего значения на его выходе. Прогнозирование значений на выходе ГПСЧ Xorshift128 и Mersenne Twister осуществляется на выходе НС, которая участвует в классификации. После определения параметров ЛКГ также возможно прогнозирование выходного значения.

5. Анализ результатов синтеза моделей МО

В процессе разработки интеллектуальной системы анализа и классификации ГПСЧ при построении моделей МО использовались процедуры оптимизации, позволяющие выбрать структуры моделей, обеспечивающие высокое быстродействие без ущерба качеству прогнозирования.

В большинстве случаев обучение моделей занимало не более 10 эпох.

При исследовании ГПСЧ «стоп-пошел» были проведены эксперименты по определению размера обучающей выборки, достаточной для получения высокого качества, что позволило сократить ее с миллионов значений до десятков тысяч. При этом время обучения сокращалось пропорционально уменьшению размера обучающей выборки.

Методы МО способны эффективно анализировать и прогнозировать работу ГПСЧ, значительно превосходя традиционные подходы. Например, восстановление чисел после операции *xorshifter* в ГПСЧ *Mersenne Twister* с использованием модели МО занимает всего 3 секунды против 35 минут методом полного перебора. Это дает возможность работы с алгоритмами более высокой сложности. Одновременно, при исследовании более сложных ГПСЧ методы МО не давали желаемого результата, а методы перебора оказывались действенными и давали положительный результат.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости интеграции различных методов для достижения поставленной цели [4]. В дальнейшем можно провести эксперименты с другими типами архитектур МО, которые могут оказаться эффективнее простой полносвязной сети, например рекуррентные сети.

Заключение

Разработанные модели МО и алгоритмы направленного перебора анализа и классификации ГПСЧ объединены в систему, способную идентифицировать последовательности. Программа, принимающая на вход псевдослучайные последовательности, классифицирует их или возвращает отрицательный ответ при отсутствии совпадений. Тесты подтвердили ее эффективность при идентификации ГПСЧ-источников последовательностей, а также корректное отклонение случайных данных, что делает систему готовой к расширению и интеграции новых моделей.

Разработанный прототип системы внедрен в учебный процесс на специальности «Компьютерная безопасность» РУТ (МИИТ). Студенты изучают применение ГПСЧ в разных сферах, проводят анализ различных типов ГПСЧ, выявляя их особенности и слабости, определяя влияние числовых параметров ГПСЧ на их качество, возможность классификации и прогнозирования [7]. Данная работа позволила

углубить понимание работы ГПСЧ, развить аналитическое мышление и практические навыки при работе с методами МО. Студенты приняли участие в создании системы, интегрировав в нее алгоритмы классификации нескольких генераторов, что подчеркивает ее образовательную и практическую ценность. Наиболее заметные результаты получены при анализе линейного конгруэнтного генератора, генераторов Геффе и «стоп-пошел».

Основные проблемы при построении системы заключались в отсутствии выявленных зависимостей между вновь сгенерированным числом и последующим, а значит, непредсказуемости ГПСЧ и использовании необратимых операций.

В будущем планируется интеграция новых генераторов в систему и усовершенствование существующих методов классификации.

Список литературы

1. Schneier B., Ferguson N. Fortuna. URL: <https://www.schneier.com/academic/fortuna/> (дата обращения: 15.12.2024).
2. Куминов В.П., Сидоренко В.Г. Решение задач анализа криптографической стойкости генераторов псевдослучайных чисел с использованием машинного обучения // Материалы XXXII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (посвящена памяти В.В. Кульбы). М.: ИПУ РАН, 2024. URL: <https://iccss2024.ipu.ru/proceedings/%D0%9A%D1%83%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B2.pdf> (дата обращения: 20.01.2025).
3. Куминов В.П., Сидоренко В.Г. Методы оценки качества генераторов псевдослучайных чисел // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. С. 631–636. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-631-636
4. Hassan M. Cracking Random Number Generators using Machine Learning – Part 1: xorshift128. URL: <https://www.nccgroup.com/us/research-blog/cracking-random-number-generators-using-machine-learning-part-1-xorshift128/> (дата обращения: 26.06.2025).
5. Common Weakness Enumeration. URL: <https://cwe.mitre.org/data/definitions/330.html> (дата обращения: 20.01.2025).
6. Вихрь Мерсенна (Справочник). URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/88739> (дата обращения: 20.01.2025).
7. Hassan, M. Cracking Random Number Generators using Machine Learning – Part 1: Xorshift128 [Сайт]. – URL: <https://research.nccgroup.com/2021/10/15/cracking-random-number-generators-using-machine-learning-part-1-Xorshift128/> (дата обращения: 20.01.2025).
8. Воронина Е.Г., Сидоренко В.Г. Генераторы случайных чисел: Учебное пособие / Российский университет

транспорта (МИИТ). М.: ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 2018. 80 с.

References

1. Schneier B., Ferguson N. Fortuna. (accessed 15.12.2024). Available at: <https://www.schneier.com/academic/fortuna>.
2. Kuminov V.P., Sidorenko V.G. [Analysing cryptographic strength of pseudorandom number generators using machine learning]. In: Proceedings of the XXXII International Conference Complex System Security Management (in memory of V.V. Kulba). Moscow: IPU RAS; 2024. (accessed 20.01.2025). (in Russ.) Available at: <https://iccss2024.ipu.ru/proceedings/%D0%9A%D1%83%D0%B%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B2.pdf>.
3. Kuminov V.P., Sidorenko V.G. [Methods for evaluating the quality of pseudorandom number generators]. In: Intelligent Transportation Systems: Proceedings of the III International Research and Practice Conference. Moscow; May 30, 2024. Moscow: Russian University of Transport (МИИТ); 2024. Pp. 631-636. (in Russ.) DOI: 10.30932/9785002446094-2024-631-636.
4. Hassan M. Cracking Random Number Generators using Machine Learning – Part 1: xorshift128. (accessed 26.06.2025). Available at: <https://www.nccgroup.com/us/research-blog/cracking-random-number-generators-using-machine-learning-part-1-xorshift128>.
5. Common Weakness Enumeration. (accessed 20.01.2025). Available at: <https://cwe.mitre.org/data/definitions/330.html>.
6. Mersenne twister (reference). (accessed 20.01.2025). Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/88739>.
7. Hassan M. Cracking Random Number Generators using Machine Learning – Part 1: Xorshift128. (accessed 20.01.2025). Available at: <https://research.nccgroup.com/2021/10/15/cracking-random-number-generators-using-machine-learning-part-1-Xorshift128>.
8. Voronina E.G., Sidorenko V.G. [Random number generators: A textbook]. Moscow: Russian University of Transport; 2018. (in Russ.)

Сведения об авторах

Автоношкин Александр Михайлович – студент, Российский университет транспорта (*Russian University of Transport (МИИТ)*), Российская Федерация, Москва, e-mail: 1146248@edu.rut-miit.ru.

Куминов Валерий Павлович – студент, Российский университет транспорта (*Russian University of Transport (МИИТ)*), Российская Федерация, Москва, e-mail: 1036301@edu.rut-miit.ru.

Сидоренко Валентина Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (*Russian University of Transport (МИИТ)*), Российская Федерация, Москва, e-mail: valenfalk@mail.ru.

Смецкая Анастасия Сергеевна – студент, Российский университет транспорта (*Russian University of Transport (МИИТ)*), Российская Федерация, Москва, e-mail: 1137782@edu.rut-miit.ru.

About the authors

Alexander M. Avtonoshkin, student, *Russian University of Transport (MIIT)*, Russian Federation, Moscow, e-mail: 1146248@edu.rut-miit.ru.

Valery P. Kuminov, student, *Russian University of Transport (MIIT)*, Russian Federation, Moscow, e-mail: 1036301@edu.rut-miit.ru.

Valentina G. Sidorenko, Doctor of Engineering, Professor, Chair Professor, Department of Management and Protection of Information, *Russian University of Transport (MIIT)*, Russian Federation, Moscow, e-mail: valenfalk@mail.ru.

Anastasia S. Smetskaya, student, *Russian University of Transport (MIIT)*, Russian Federation, Moscow, e-mail: 1137782@edu.rut-miit.ru.

Вклад авторов в статью

Автоношкин А.М. – анализ работы генератора псевдослучайных чисел «стоп-пошел».

Куминов В.П. – анализ работы генераторов псевдослучайных чисел Xorshift128 и Mersenne Twister, планирование работы по исследованию других генераторов псевдослучайных чисел.

Сидоренко В.Г. – руководство работой и обобщение полученных результатов.

Смецкая А.С. – разработка программного обеспечения для анализа работы генератора псевдослучайных чисел «стоп-пошел».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Понятие «Надежность систем энергетики» The concept of “Energy system dependability”

Дубицкий М.А.^{1*}
Dubitskii M.A.

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация
¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation
*dubitskii_ma@mail.ru



Дубицкий М.А.

Резюме. Цель. Обосновать смысловое содержание понятия надежность систем энергетики. Оценить необходимость использования таких терминов, как краткосрочная, долгосрочная, балансовая, системная и режимная надежность в сборниках рекомендуемых терминов и справочниках. Дать научное обоснование необходимости пересмотра содержания терминологии «Надежность систем энергетики. Сборник рекомендуемых терминов», опубликованной в 2007 г. **Методы.** В статье используются логические процедуры, состоящие в придании строго фиксированного смысла такому понятию как надежность систем энергетики. **Результаты.** Крупные аварии за последние 30-40 лет в системах энергетики разных стран свидетельствуют о необходимости более пристального внимания к проблеме обеспечения безопасности. Однако из терминологии «Надежность систем энергетики. Сборник рекомендуемых терминов», опубликованной в 2007 г. был исключен термин «безопасность». В тексте терминологии утверждается, что «главный мотив для исключения безопасности из состава свойств надежности объектов энергетики – его невостребованность на протяжении 27 лет». Нет теоретического обоснования для исключения термина «безопасность» из терминологического справочника. Как можно говорить о невостребованности свойства безопасности, когда в электроэнергетической системе была авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г., а 17 августа 2009 г. авария на Саяно-Шушенской ГЭС, которая унесла жизни 75 человек? В терминологии 2007 г. отмечается, что необходимость ее разработки была обусловлена «... изменениями внешних условий функционирования и развития систем энергетики (либерализация экономики, появление рынков энергии) ...». Надежность – это свойство (характерный признак, составляющий отличительную особенность) систем энергетики и поэтому либерализация экономики не может повлиять на содержание понятия «надежность», может повлиять только на требуемый уровень обеспечения надежности, на критерии принятия решений и модели обеспечения надежности. Для ускорения взаимопонимания между специалистами (занимающимися исследованием надежности систем энергетики) в процессе их общения появился ряд терминов, представляющих собой набор упрощенных (сокращенных или образных) слов, например, режимная надежность, краткосрочная надежность, долгосрочная надежность, балансовая надежность и т.д., которые представляют собой абстрактное представление о надежности систем энергетики, отраженное с теми или иными допущениями в соответствующих моделях исследования надежности. Нет необходимости вводить эти термины в сборники рекомендуемых терминов или справочники (так как перечень заданных функций систем энергетики не изменяется, а поэтому остается без изменений и свойство). **Выводы.** Надежность систем энергетики – комплексное многоаспектное свойство как при государственном регулировании экономикой, так и в рыночных условиях. Содержание понятия надежность систем энергетики не зависит от формы собственности, не зависит от смены собственника объекта, не зависит и от заблаговременности принятия решений по обеспечению надежности.

Abstract. Aim. To substantiate the semantic content of the concept of energy system dependability. To assess the applicability of such terms as short-term, long-term, overall and cross-mode dependability, as well as adequacy as part of collections of recommended terms and reference books. To scientifically substantiate the revised content of Energy system dependability. Collection of recommended terms published in 2007. **Methods.** The paper employs logical procedures that consist in giving an unchanging meaning to such a concept as energy system dependability. **Results.** Major accidents that have occurred in energy systems of various countries over the past 30 to 40 years indicate that the problem of safety deserves closer attention. However, the term “safety” is not featured in Energy system dependability. Collection of recommended terms published in 2007. The terminology states that “the exclusion of safety from the properties of energy facility dependability was primarily motivated by the fact that it had been in no demand for 27 years”. There is no theoretical substantiation for excluding the term “safety” from the terminology handbook. How can we talk about no demand for the property of safety given the Chernobyl nuclear power plant disaster on April 26, 1986 and the Sayano-Shushenskaya HPP

accident of August 17, 2009 that claimed the lives of 75 people? The 2007 terminology notes that its development was motivated by "... changing conditions surrounding the operation and development of energy systems (liberalisation of the economy, the emergence of energy markets)..." Dependability is a property (a characteristic that constitutes a distinctive feature) of energy systems, therefore the liberalisation of the economy cannot affect the content of the concept of "dependability". It may only affect the required level of dependability, the decision-making criteria and dependability models. To simplify understanding, experts (involved in the study of energy system dependability) have come up with a number of terms that are a set of simplified (abbreviated or figurative) words, e.g., cross-mode dependability, short-term dependability, long-term dependability, overall dependability, etc., that represent an abstract idea of energy system dependability that is reflected – with certain assumptions – in the respective models of dependability research. There is no need to integrate such terms in collections of recommended terms or reference books (since the list of specified functions of energy systems does not change, therefore the property remains unchanged). **Conclusions.** Energy system dependability is a complex multidimensional property both in terms of public regulation of the economy, and under market conditions. The content of the concept of energy system dependability does not depend on the form of ownership, does not depend on an entity's change of ownership, does not depend on advance decisions associated with ensuring dependability.

Ключевые слова: свойства, надежность, безопасность, системы энергетики, терминология, заданные функции объекта.

Keywords: properties, dependability, safety, energy systems, terminology, intended functions of facility.

Для цитирования: Дубицкий М.А. Понятие «Надежность систем энергетики» // Надежность. 2025. №3. С. 29–33. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-29-33>

For citation: Dubitskii M.A. The concept of "Energy system dependability". Dependability 2025;3: 29–33. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-29-33>

Поступила: 14.02.2025 / **После доработки:** 10.05.2025 / **К печати:** 25.07.2025

Received on: 14.02.2025 / **Revised on:** 10.05.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Введение

С 1973 г. при Сибирском энергетическом институте (СЭИ) СО АН СССР начал работать Всесоюзный научный семинар «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» под руководством члена-корреспондента АН СССР Юрия Николаевича Руденко. Решение по поводу организации семинара было направлено письмом в адрес СЭИ СО АН СССР от академика Аксель Ивановича Берга, который возглавлял научный совет АН СССР по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР. Обеспечение надежности он называл «проблемой номер один». Начиная с 1976 г. семинар работал при Отделении физико-технических проблем энергетики АН СССР. Уже первые заседания семинара показали, что отсутствие единой, упорядоченной терминологии нарушало взаимопонимание специалистов. Им приходилось перед началом своего доклада давать свое определение для тех терминов, которые они использовали в докладе, начиная в первую очередь с такого понятия как «надежность». Назрела необходимость в построении научно обоснованной терминологии в такой области знаний как надежность систем энергетики.

1. Обзор источников

В марте 1976 г. в г. Иркутске было проведено заседание семинара, где было положено начало построения терминологии. Первая редакция проекта терминологии была осуществлена на основе предложений, выработанных

семинаром. В результате обсуждения материала первой редакции проекта комиссией была подготовлена вторая редакция проекта терминологии. Она была направлена ряду специалистов в области надежности систем энергетики. Их замечания и предложения были использованы при разработке третьего варианта проекта. Он был разослан в научно-исследовательские, проектные и эксплуатационные организации, которые дали обстоятельные заключения. С учетом замечаний была составлена четвертая редакция проекта, разосланного уже по более широкому кругу организаций (139 организаций, от 81 получены ответы и замечания). Для дополнительного обсуждения была подготовлена пятая редакция. После тщательного анализа отзывов, внесения необходимых уточнений и дополнений комиссия завершила работу над сборником рекомендуемых терминов «Надежность систем энергетики». Сборник рекомендуемых терминов «Надежность систем энергетики. Терминология» был опубликован в 1980 г. [1]. На формирование понятия надежности систем энергетики оказало влияние сотрудничество с признанным лидером в области теории надежности и ее приложений профессором Игорем Алексеевичем Ушаковым. В 1994 г. был опубликован первый том справочника по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики, написанный в основном Ю.Н. Руденко и И.А. Ушаковым [2]. В первом томе справочника использовалась Терминология, предложенная в сборнике рекомендуемых терминов «Надежность систем энергетики. Терминология» [1].

2. Методы

На одном из заседаний семинара Ю.Н. Руденко (видимо, предвидя в будущем желание следующими поколениями специалистов внести какие-то изменения или дополнения в разработанную Терминологию) предупредил, что для любых изменений в Терминологии должны быть приведены соответствующие обоснования. Действительно, через 13 лет после публикации первого тома справочника была разработана следующая редакция Терминологии новой комиссией под председательством уже Н.И. Воропая, которая была опубликована в 2007 г. [3]. Из прежней комиссии по разным причинам работали только три человека: Н.И. Илькевич, В.В. Могирев и М.Б. Чельцов. С введением новой терминологии появились и ошибки (у американцев есть поговорка: «Не чини того, что не сломалось, – сломаешь!»).

Во-первых, в Терминологии 2007 г., в отличие от Терминологии 1980 г., для объектов энергетики рассматривается только одна заданная функция: «Применительно к объектам энергетики их основной заданной функцией является снабжение потребителей соответствующей энергетической продукцией (энергоресурсом) требуемого качества» [3]. Поэтому отсутствует в Терминологии 2007 г. термин «безопасность». Нет теоретического обоснования для исключения термина «безопасность» из терминологического справочника, а «обоснование» для исключения этого термина выглядит следующим образом: – «главный мотив для исключения безопасности из состава свойств надежности объектов энергетики – его невостребованность на протяжении 27 лет» (авторы новой Терминологии, видимо, уже забыли об аварии на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г.) [3]. Справедлив ли был главный аргумент в Терминологии 2007 г. для исключения свойства безопасность? Ответом является авария, которая произошла 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС и унесла жизни 75 человек, т.е. через 2 года после опубликования Терминологии 2007 г. Как можно на это «закрывать глаза» и говорить о невостребованности свойства безопасность? Крупные аварии за последние 30-40 лет в системах энергетики разных стран свидетельствуют о необходимости более пристального внимания к проблеме обеспечения безопасности.

Во-вторых, по мнению авторов Терминологии 2007 г. необходимость ее разработки была обусловлена тем, что «теория надежности систем энергетики получила существенное развитие», а также «в связи с изменениями внешних условий функционирования и развития систем энергетики (либерализация экономики, появление рынков энергии) изменились и подходы к исследованию и обеспечению надежности» [3]. Такое утверждение не выдерживает критики. Существенное развитие теории надежности получило при Терминологии 1980 г. Надежность – это свойство (характерный признак, составляющий отличительную особенность) систем энергетики и поэтому либерализация экономики не может повлиять на содержание понятия «надежность», может повлиять только на требуемый уровень обеспечения надежности, на критерии принятия решений и модели обеспечения надежности, но

даже такие изменения не всегда происходят. Достаточно вспомнить, что в электроэнергетических системах требования к обеспечению надежности потребителей первой, второй и третьей категории не изменились. Смена условий хозяйствования или смена собственника не могут быть причиной для разработки новой Терминологии.

В-третьих, в Терминологии 2007 г. используются новые понятия надежности: (например, краткосрочная надежность, долгосрочная надежность и т.д. [3]), которые отличаются от такого понятия как «надежность электроэнергетической системы». В основе новых понятий надежности должен быть соответственно и новый перечень заданных функций объекта. *Перечень заданных функций объекта* по сути дела это *признак*, по которому можно разграничить те или иные понятия о надежности объектов. В том случае, когда состав заданных функций не меняется (а он не изменился), рассматривается ли объект сегодня, завтра или через какое-то другое время, то содержание понятия для такого свойства, как надежность, как бы оно иначе не называлось, не изменится. Следовательно нет необходимости вводить какие-либо термины в сборниках рекомендуемых терминов или справочниках вместо надежности систем энергетики (перечень заданных функций систем энергетики не изменился).

В-четвертых, в связи с чем же появились такие понятия как краткосрочная надежность, долгосрочная надежность и т.д.? Развитие науки обычно начинается с того или иного экспериментального исследования, обобщения опытных данных, далее развивается теория. «От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике – таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности» (В.И. Ленин. Полн. собр. соч., т.29, стр. 152-153). Развитие моделей исследования надежности способствовало принятию решений с различной заблаговременностью для задач, связанных с обеспечением надежности систем энергетики. Модели отличались по составу учитываемых факторов, влияющих на надежность, исходными данными, допущениями, принимаемыми при формировании модели и т.д. Абстрактные представления о надежности систем энергетики отражались в соответствующих моделях исследования надежности. Для ускорения взаимопонимания между специалистами (занимающимися исследованием надежности систем энергетики) в процессе их общения появился ряд терминов, представляющих собой набор упрощенных (сокращенных или образных) слов. Например, надежность системы как сложного технического или производственного объекта заменяется таким термином как «системная надежность». Составляющая надежности, обусловленная ее структурой, называется «структурной надежностью» [3, 4]. Если в моделях при исследовании надежности рассматриваются только режимы работы системы, то тогда речь идет о «режимной надежности» [3, 5]. Если оценка надежности с помощью модели выполняется на краткосрочном интервале времени, то надежность называется «краткосрочной надежностью» [3]. Если в модели оценки надежности учитывается удовлетворение требований потребителей в пределах заданных

значений и ограничений на поставки энергоресурса с учетом запланированных и незапланированных перерывов в работе его элементов и эксплуатационных ограничений, то это уже оценка «балансовой надежности» [3, 6, 7].

3. Результаты

Такие термины, как системная надежность, структурная надежность, режимная надежность, долгосрочная надежность, краткосрочная надежность и балансовая надежность, приведенные в Терминологии 2007 г., являются, по сути дела, профессиональным жаргоном, который используется группой людей (объединенных по профессиональному признаку). Этим терминам не место в Терминологии.

Ошибки появились и во втором томе справочника (Надежность электроэнергетических систем. Под ред. М.Н. Розанова), где уже под балансовой надежностью предлагается понимать «надежность баланса» энергии и мощности. Вместо электроэнергетических систем предлагается рассматривать другой объект исследования – «баланс энергии и мощности» [8].

Ошибки появились и в отдельных публикациях, например, инженерно-технических работников вводят в заблуждение, ошибочно утверждая, что в рыночных условиях надежность – услуга [9, 10]. Услугой может быть, например, обеспечение на договорной основе требуемой надежности энергоснабжения потребителей. Надежность систем энергетики – комплексное многоаспектное свойство как при государственном регулировании экономикой, так и в рыночных условиях. Включает в себя такие свойства как надежность энергоснабжения и безопасность систем энергетики.

Инженерно-технических работников вводят в заблуждение и тогда, когда ошибочно утверждают, что в рыночных условиях надежность – товар [11]. Системы энергетики являются объектами, продуктами деятельности человека. Надежность – это свойство объектов. «Существуют» не свойства, а объекты или продукты, которые отличаются друг от друга своими свойствами.

Следует сказать, что анализ событий, которые имеют место при проведении Специальной военной операции, свидетельствует о том, что смысловое содержание термина «живучесть» должно быть иным, чем в опубликованных Терминологиях. Каскадное развитие аварии с массовым ограничением потребителей – не признак отказов по живучести. Основным признаком отказов по живучести являются отказы при экстремальных внешних воздействиях на систему. Следовало в Терминологиях для термина «живучесть» записать так: «Живучесть – свойство объекта противостоять внешним возмущениям, на которые он не рассчитывался для обычных условий функционирования». Средства обеспечения живучести должны предусматривать противодиверсионные мероприятия. Свойство электроэнергетической системы не допускать каскадного развития аварии характеризует режимную управляемость объекта [12, 13].

Заключение

Надежность систем энергетики – комплексное многоаспектное свойство как при государственном регулировании экономикой, так и в рыночных условиях. Содержание понятия надежность систем энергетики не зависит от формы собственности, не зависит от смены собственника объекта, не зависит и от заблаговременности принятия решений по обеспечению надежности (поэтому нет необходимости использовать в сборниках рекомендуемых терминов и справочниках такие термины как краткосрочная надежность, долгосрочная надежность, балансовая надежность и т.д.). Условия хозяйствования объектом могут оказать влияние на фактически обеспечиваемую надежность и (или) на требуемый уровень обеспечения надежности систем энергетики, но не на содержание понятия надежность систем энергетики (надежность – это ни товар, ни рыночная услуга, ни общественное достояние, а свойство объекта [9, 10, 11]).

Такие термины, например, как краткосрочная надежность, долгосрочная надежность, режимная надежность, балансовая надежность или, например, плановая надежность и т.д. (которые представляют собой абстрактное представление о надежности систем энергетики, отраженное с теми или иными допущениями авторами публикаций в соответствующих моделях исследования надежности) не следует размещать в сборниках рекомендуемых терминов или справочниках.

Список литературы

1. Надежность систем энергетики. Терминология: Сборник рекомендуемых терминов. М.: Наука, 1980. Вып. 95. 43 с.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования / Под общей редакцией Ю.Н. Руденко: В 4-х т.: Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / Под ред. Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1994. 480 с.
3. Надежность систем энергетики. Сборник рекомендуемых терминов. М.: Энергия, 2007. 192 с.
4. Сердюкова Е.В., Барахтенко Е.А. Исследование структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 72. Надежность систем энергетики в условиях их цифровой трансформации. В 2-х книгах. Книга 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2021. С. 406-415.
5. Осака А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Гибкость и режимная надежность энергосистем, методы анализа и критерии их оценки в условиях цифровой трансформации электроэнергетики // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 72. Надежность систем энергетики в условиях их цифровой трансформации. В 2-х книгах. Книга 1 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2021. С. 343-352.

6. Крупенев Д.С., Беляев Н.А. Обоснование нормативов показателей балансовой надежности на современном этапе Единой энергосистемы России // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 72. Надежность систем энергетики в условиях их цифровой трансформации. В 2-х книгах. Книга 1 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2021. С. 136-145.

7. Чукреев Ю.Я., Чукреев М.Ю. Модели оценки показателей балансовой надежности при управлении развитием электроэнергетических систем. – Сыктывкар Коми НЦ УрО РАН, 2014. 207 с.

8. Надежность систем энергетики и их оборудования / Под общей редакцией Ю.Н. Руденко: В 4-х т.: Т. 2: Надежность электроэнергетических систем. Справочник / Под ред. М.Н. Розанова. М.: Энергоатомиздат, 2000. 568 с.

9. Воропай Н.И. Надежность систем электроснабжения. Новосибирск: Наука, 2006. 205 с.

10. Кучеров Ю.Н. Надежность электроснабжения – общественное достояние или рыночная услуга? // ЭнергоРынок. 2004. № 11.

12. Эдельман В.И. Развитие механизмов управления надежностью электроснабжения в современных условиях // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик». 2015. № 8. 131 с.

13. Дубицкий М.А. Надежность энергоснабжения и безопасность систем энергетики // Вестник ИрГТУ, 2013 (80). С.211–216.

14. Dubitsky M.A. Reliability of Energy Systems // Reliability: Theory & Applications. 2013. Vol. 8. № 3. Issue of September.

References

1. [Energy system dependability. Collection of recommended terms]. Moscow: Nauka; 1980. (in Russ.)

2. Rudenko Yu.N., editor. [Dependability of energy systems and equipment. In 4 volumes. Vol. 1. Handbook of general analysis and synthesis models of energy system dependability]. Moscow: Energoatomizdat; 1994. (in Russ.)

3. [Energy system dependability. Collection of recommended terms]. Moscow: Energia; 2007. (in Russ.)

4. Serdiukova E.V., Barakhtenko E.A. [A research of the structural dependability of an integrated power and heat supply system]. In: Voropay N.I., editor. [Methodological aspects of large energy system dependability research: Issue 72. Dependability of energy systems undergoing digital transformation. In 2 books. Book 2]. Irkutsk: ISEM SB RAS; 2021. Pp. 406-415. (in Russ.)

5. Osak A.B., Panasetsky D.A., Buzina E.Ya. [Flexibility and cross-mode dependability of power systems, methods of analysis, and evaluation criteria in the context of digital transformation of the electric power industry]. In: Voropay N.I., editor. [Methodological aspects of large energy system dependability research: Issue 72. Dependability of energy systems undergoing digital transformation. In 2 books. Book 1]. Irkutsk: ISEM SB RAS; 2021. Pp. 343-352. (in Russ.)

6. Krupenev D.S., Beliaiev N.A. [A substantiation of the standard values of overall dependability at the present stage of development of the Unified Energy System of Russia]. In: Voropay N.I., editor. [Methodological aspects of large energy system dependability research: Issue 72. Dependability of energy systems undergoing digital transformation. In 2 books. Book 1]. Irkutsk: ISEM SB RAS; 2021. Pp. 136-145. (in Russ.)

7. Chukreev Yu.Ya. [Models for evaluating the overall dependability indicators while managing power system development]. Syktyvkar Komi RC of the UrD of the RAS; 2014. (in Russ.)

8. Rudenko Yu.N., editor. [Dependability of energy systems and equipment. In 4 volumes. Vol. 2. Rozanov M.N., editor. Handbook of energy system dependability]. Moscow: Energoatomizdat; 2000. (in Russ.)

9. Voropay N.I. [Dependability of power supply systems]. Novosibirsk: Nauka; 2006. (in Russ.)

10. Kucherov Yu.N. [Dependability of power supply. A public domain or a market service?]. *Energorynok* 2004;11.

12. Edelman V.I. [Developing power supply dependability management mechanisms in today's conditions]. *Power Engineering Abroad* 2015;8:131. (in Russ.)

13. Dubitskii M.A. [Dependability of power supply and safety of energy systems]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 2013;80:211-216. (in Russ.)

14. Dubitsky M.A. Reliability of Energy Systems. *Reliability: Theory & Applications* 2013;8(3).

Сведения об авторе

Дубицкий Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник АН СССР, 664003, Иркутск, Иркутская область, ул. Лапина, дом 9, кв. 4, Российская Федерация, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация, доцент, dubitskii_ma@mail.ru

About the author

Mikhail A. Dubitskii, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Academy of Sciences of the USSR, Irkutsk, Irkutsk Oblast, 664003, 9 Lapina st., apt. 4, Russian Federation, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, Associate Professor, dubitskii_ma@mail.ru

Вклад автора в статью.

Полностью авторская работа. Статья позиционируется как дискуссионная. Цель статьи – дать научное обоснование необходимости пересмотра содержания терминологии «Надежность систем энергетики. Сборник рекомендуемых терминов», опубликованной в 2007 г.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Проблематика формирования извещения на железнодорожных переездах

Problems associated with warning generation at railway crossings

Радковский С.А.¹, Трунаев А.М.^{2*}
Radkovsky S.A.¹, Trunaev A.M.^{2*}

¹Донецкий институт железнодорожного транспорта, Донецкая Народная Республика, Донецк

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, Ростов

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

²Rostov State Transport University, Russian Federation, Rostov

*andrey.trunayev@mail.ru



Радковский С.А.



Трунаев А.М.

Резюме. Цель. Провести исследование работы процесса функционирования существующих переездных устройств. Рассмотреть подробный алгоритм работы заградительных устройств, в котором учитывается исправная работа каждого элемента. В действующих системах ограждения переезда применяются упрощенные алгоритмы работы. Уделить внимание процессу формирования извещения к переезду при движении поезда по участку извещения. Подробно рассмотреть работу операторов, которые определяют расстояние до подвижной единицы и, как следствие, определяют время начала включения заградительных устройств. Что позволит корректировать время включения заградительных устройств и, как следствие, уменьшить простой автотранспорта. **Методы.** Предложен метод, который заключается в непрерывном измерении акселерометром виброперемещений рельсовой линии у переезда. При постоянном измерении значений виброскорости (V) и виброускорения (a) у границы переезда, формируется множество измеренных значений V_i и a_i . С использованием этих значений составляется система уравнений координаты расположения поезда, правая часть которого приравнивается к значениям координат поезда. Решая систему уравнений координаты расположения поезда, по значениям виброскорости (V) и виброускорения (a) у границы переезда при приближении поезда к переезду можно определить координату подвижной единицы в определенный момент времени. Как следствие, скорость и характер движения на всем участке извещения. Из полученных значений можно определить время, за которое голова поезда проедет переезд. Сравнивая расчетное время включения заградительных устройств с временем, полученным от характера движения конкретного поезда, можно определить момент включения ограждения переезда. **Результаты.** Проведенное исследование показало, что существующие системы формирования извещения к железнодорожным переездам в пределах станции, как правило, заблаговременно включают заградительные устройства. Что может привести к излишнему простоя автотранспорта перед переездом. При фиксированной длине участка приближения фактическое время оповещения обратно пропорционально скорости поезда и может значительно превышать минимально необходимое время. Излишнее время оповещения может повлечь за собой негативные последствия, что требует решения. При регулярном длительном закрытом состоянии переезда водители будут стараться ускорить процесс пересечения переезда при включении заградительных сигналов, что может привести к аварийной ситуации, столкновению поезда и автотранспортного средства. Полученные данные о фактическом времени приближения поезда к переезду позволят сократить время простоя автотранспорта у заградительных устройств переезда при закрытых переездных устройствах до времени, равного расчетному времени закрытия и времени проследования через переезд поезда. Средняя скорость движения поездов по Российской Федерации составляет 35,7 км/ч [1], а расчет извещения проводится для максимальной скорости. **Заключение.** Время простоя автотранспорта перед заградительными устройствами можно сократить в среднем в 3-4 раза. Как следствие, снизить аварийность на переездах.

Abstract. Aim. To study the process of operation of the existing level crossing devices. To examine a detailed barrier operation algorithm that takes into account the proper operation of each component. The existing level crossing protection systems use simplified operation algorithms. To focus on the process of crossing warning generation when a train enters the warning section. To examine in detail the work of operators who identify the distance to a vehicle and, consequently, the barrier activation time. That will allow adjusting the barrier activation time and, consequently, reduce the rolling stock downtime. **Methods.** The paper suggests a

method that involves continuously measuring the vibration displacements of the rails at the crossing using an accelerometer. By continuously measuring the values of vibration velocity (V) and vibration acceleration (a) at the boundary of a crossing, a set of measured values V_i and a_i is generated. These values are used for making a system of equations for the train location coordinate, whose right part is equated to the values of the train coordinates. By solving the system of train coordinate equations using the values of vibration velocity (V) and vibration acceleration (a) at the boundary of a crossing at the approach of a train, the coordinate of the vehicle can be defined at specific points in time. Consequently, the speed and nature of its movement can be identified throughout the warning section. Out of the obtained values, the time of the train's head clearing the crossing can be identified. By comparing the estimated barrier activation time with the time derived from the nature of a train's movement, the moment of crossing barrier activation can be identified. **Results.** The study showed that the existing level crossing warning systems deployed within stations normally activate barriers in advance. That may cause motor vehicles to spend excessive amounts of time before a crossing. If the length of the approach section is fixed, the actual warning time is inversely proportional to the train's speed and may significantly exceed the minimum required time. Excessive warning time may have negative consequences, which requires a solution. If a crossing is regularly closed for long periods of time, drivers will be attempting to cross faster once the restrictive signal has turned on, which may lead to accidents, train-to-motor vehicle collisions. Should data on the actual time of a train's arrival to a crossing be available, the time spent by motor vehicles at closed crossings will be able to be reduced down to the estimated closing time and the time it takes for the train to clear the crossing. The average train speed in the Russian Federation is 35.7 km/h [1], while warnings are calculated for the top speed. **Conclusion.** The time spent by vehicles before a barrier can be reduced about 3 to 4 times. Consequently, the number of accidents at crossings can be reduced as well.

Ключевые слова: переезд, извещение, станция, виброускорение, заградительные устройства, формирование извещения

Key words: crossing, warning, station, vibration acceleration, barriers, warning generation

Для цитирования: Трунаев А.М., Радковский С.А. Проблематика формирования извещения на железнодорожных переездах // Надежность. 2025. №3. С. 34-41. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-34-41>

For citation: Trunaev A.M., Radkovsky S.A. Problems associated with warning generation at railway crossings. *Dependability* 2025;3: 34-41. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-34-41>

Поступила: 09.04.2025 / **После доработки:** 14.05.2025 / **К печати:** 25.07.2025

Received on: 09.04.2025 / **Revised on:** 14.05.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Введение

Безопасность на железнодорожных переездах, местах пересечения железнодорожных путей и автомобильных дорог, остается одной из наиболее актуальных проблем, требующих внимания общества и государства. Каждый год в мире случаются тысячи аварий на железнодорожных переездах, часто с трагическими последствиями. По данным Всемирной организации здравоохранения, более 50% всех происшествий на железнодорожных переездах происходят из-за нарушений правил безопасного проезда со стороны водителей автотранспорта [2].

Одной из основных причин аварий на переездах является недостаточное внимание со стороны водителей и увеличенное время ожидания приближения поезда к переезду, как следствие, повышение нервозности и пересечение переезда на запрещающие сигналы [3]. Также недостаточная осведомленность о правилах поведения при приближении к переезду. Многие водители игнорируют дорожные знаки, предупреждающие о приближении к железнодорожному переезду, не соблюдают установленные ограничения скорости или не останавли-

ваются перед закрытыми шлагбаумами. Это приводит к столкновениям с поездами, что, в свою очередь, часто оборачивается трагическими последствиями.

Меры по повышению безопасности на местах пересечения железнодорожных путей и автомобильного транспорта должны быть комплексными. Водителям необходимо регулярно напоминать о правилах безопасного проезда через переезды, в том числе с помощью информационных кампаний и обучающих программ. Кроме того, необходимо усилить контроль за соблюдением этих правил и ввести более строгие штрафы за их нарушение.

Важным этапом в повышении безопасности на переездах является также техническое оснащение. Современные системы безопасности, такие как светофоры, звуковые и световые сигналы, видеонаблюдение, способны значительно снизить риск аварий на переездах. Однако их внедрение должно быть сопровождено регулярным техническим обслуживанием и контролем качества работы. Разработкой, исследованием и внедрением новых, перспективных систем автоматики, повышающих

безопасность на железнодорожных переездах с минимизацией человеческого фактора в управлении процессом функционирования.

1. Заградительные устройства на переездах

При пересечении автомобильных дорог с железной дорогой в одном уровне осуществляется установка различных ограждающих устройств. Эти устройства включают: автоматическую светофорную переездную сигнализацию, автоматические шлагбаумы или автоматические предупредительные сигналы, а также неавтоматические шлагбаумы и заградительные плиты.

Светофорная переездная сигнализация включает в себя светофоры с двумя красными огнями, установленными с обеих сторон автомобильной дороги с правой стороны, по ходу движения транспорта на расстоянии 6 метров от переезда. Когда требуется остановить движение автотранспорта через переезд, сигналы подаются в сторону автомобильной дороги.

Работа светофоров на переездах запускается движением поездов по рельсовым цепям (РЦ), установленным перед переездом. При приближении поезда светофор начинает мигать красными огнями 40–45 миганий в минуту. Кроме того, работа светофора сопровождается звуковым сигналом.

Автоматические шлагбаумы и заградительные плиты дополняют автоматическую светофорную переездную сигнализацию. По умолчанию шлагбаум открыт, не препятствуя движению автотранспорта. Когда светофор включается, при обнаружении поезда, со временной задержкой (от 7 до 8 секунд) шлагбаумы медленно опускаются в течение 10 секунд, чтобы транспортные средства могли покинуть переезд. В закрытом состоянии шлагбаумы частично или полностью перекрывают дорогу, а заградительные плиты полностью блокируют доступ на переезд. Как только поезд проходит, светофоры гаснут, шлагбаумы поднимаются, а плиты опускаются [4, 5].

Система автоматической оповестительной сигнализации предназначена для предупреждения дежурного на переезде о приближении поезда с помощью звуковых и световых сигналов. Дежурный по переезду может самостоятельно управлять шлагбаумами. Автоматическая оповестительная сигнализация часто используется на переездах, которые расположены на территории станции или рядом с ней, где невозможно автоматически синхронизировать работу устройства на переезде с движением поездов на станции. На сегодняшний день полностью исключить человеческий фактор из алгоритма управления охраняемыми переездами не предоставляется возможным. Так как сложно автоматизировать все возможные ситуации и учесть их в процессе управления заградительными устройствами. В рамках данной работы это исследование не проводится в виду его большего объема. Данной проблеме будет посвящено отдельное научное исследование.

Человеческий фактор присутствует в работе автоматических ограждающих устройств на переездах, извещение которых формируется с учетом работы станционных элементов автоматики. Как правило такие схемы формирования извещения отличаются от перегонных, на каждой станции имеются свои отличительные особенности. Работа этих устройств зависит от сигналов, отправляемых выходными и входными светофорами. В отдельных случаях от занятия определенных РЦ на станции. Также заградительные устройства могут напрямую управляться дежурным по станции при помощи специальной кнопки закрытия переезда, например, при маневровой работе по станции. В таком случае неквалифицированные действия могут привести к несвоевременному закрытию переездных устройств и, как следствие, к столкновениям автомобилей и подвижного состава с вытекающими последствиями [6]. Исключить влияние человека в подобных ситуациях не предоставляется возможным. Поэтому вопрос повышения уровня безопасности на станциях остается актуальным.

В случаях, когда время уведомления для переезда, расположенного на горловине станции, обеспечено при движении поезда от сигнальных светофоров (входного или выходного), системы формирования извещения активируются с момента захода поезда в зону приближения при открытом сигнале светофора. Если условия не выполнены, закрытие переезда происходит до момента, когда поезд начинает движение к этому участку, вне зависимости от положения входного светофора. Закрытие переезда осуществляет дежурный по станции при отправлении поезда, а открытие выходных сигналов задерживается для компенсации недостающего времени уведомления. При определении длины зон приближения для переездов предполагается, что поезд движется по основному и второстепенным путям без остановок. Для основных путей учитывается предельно разрешенная скорость движения поездов, а для второстепенных – скорость составляет 50 или 80 км/ч в зависимости от типа крестовины [7].

Важно отметить, что при расчете времени формирования извещения о начале движения поезда не учитывается запасное время. Вместо этого во внимание принимается интервал времени, который нужен машинисту для реакции на сигнал и начала движения. Таким образом, фактические данные о времени уведомления определяются следующим образом:

$$t_{изв} = t_{прив} + t_{ход} + \sqrt{\frac{2d}{a}},$$

где $t_{прив}$ – время восприятия сигнала машинистом и приведения поезда в движение;

$t_{ход}$ – время, необходимое для хода поезда от выходного светофора до переезда;

d – расстояние от точки остановки поезда до переезда;

a – ускорение поезда.

Полученные данные фактического времени сравниваются с табличными значениями. В момент отправления

поезда переезд закрывается с помощью нажатия кнопки, а светофор – с некоторой задержкой времени, для обеспечения безопасности. В случаях, когда требуется организация маневровых передвижений или отправление под запрещающий сигнал, использование специальной кнопки обязательно.

Системы автоматического контроля на железнодорожных переездах, как правило, представляют собой системы жесткого управления. Рабочий алгоритм автоматической переездной сигнализации (АПС) включает в себя элементы, еще не встречающиеся в современных системах, но которые играют ключевую роль в повышении безопасности и эффективности работы переездов. Эти элементы и методы их реализации находятся в стадии разработки и будут внедряться постепенно.

Алгоритм работы системы АПС (рис. 1) включает набор операторов, которые не существуют в текущих системах, но их важность в повышении безопасности и проходимости железнодорожных переездов очевидна.

Эти операторы представлены пунктирной линией. Методы и средства их реализации находятся в разработке и будут внедрены по мере совершенствования систем АПС. Операторы, обозначенные сплошной и пунктирной линиями, уже существуют в текущих системах, однако они часто выполняют информационные функции или требуют вмешательства человека для исполнения своих обязанностей.

Рассмотрим работу алгоритма более подробно. Если приближающихся поездов нет, переезд остается открытым для проезда автомобилей. Как только поезд въезжает в зону контроля, что отслеживается оператором 1, к системе АПС подсоединяются сенсоры для обнаружения препятствий на переезде (УОП). Определяются такие параметры движения поездов, как скорость, ускорение и координаты, на основании которых вычисляется дистанция до переезда, при достижении которой необходимо закрытие переезда. Эту работу выполняют операторы 2, 3 и 4. Проверку последнего условия проводит логический оператор 5. Когда поезд достигает заданной координаты, оператор 6 активирует систему предупреждения, включая красные мигающие света на светофорах переезда. Проверку их функционирования осуществляет оператор 7.

С учетом необходимой задержки (операторы 8 и 9) команду на опускание шлагбаумов дает оператор 10.

В стандартных настройках системы АПС команды к операторам 6 и 8 подаются одновременно. После получения сведений от оператора 11 о нормальной работе шлагбаума и отсутствии преград на переезде, переезд остается закрытым до момента проезда поезда, подтвержденного оператором 12. После того, как предыдущий поезд освобождает переезд и после проверки наличия других приближающихся поездов оператором 13, происходит отключение сигнализации, поднятие шлагбаумов и деактивация сенсоров (операторы 14, 15 и 16). Система АПС восстанавливает исходное состояние.

В случае неисправности переездной сигнализации, не закрытия автошлагбаума или наличия препятствий

на переезде возникает аварийная ситуация, требующая немедленных действий для предотвращения аварии. Операторы 7, 11 и 12 включают заградительную сигнализацию и отключают кодирование РЦ, выполненное операторами 13 и 14. Это приводит к замедлению скорости поезда и его последующей полной остановке. После устранения неисправностей или препятствий, что подтверждается оператором 15, заградительная сигнализация выключается и включается кодирование РЦ, после чего поезд продолжает движение, и система АПС возвращается в изначальное положение.

На практике функции, предусмотренные для операторов 2-5, в большинстве не предусмотрены системами АПС, а операторы 7 и 11 служат лишь каналами для отправки информации в системе управления движением. Операции 12-17, хотя и задумываются в проекте и оснащении системы АПС, возлагаются исключительно на дежурного по переезду.

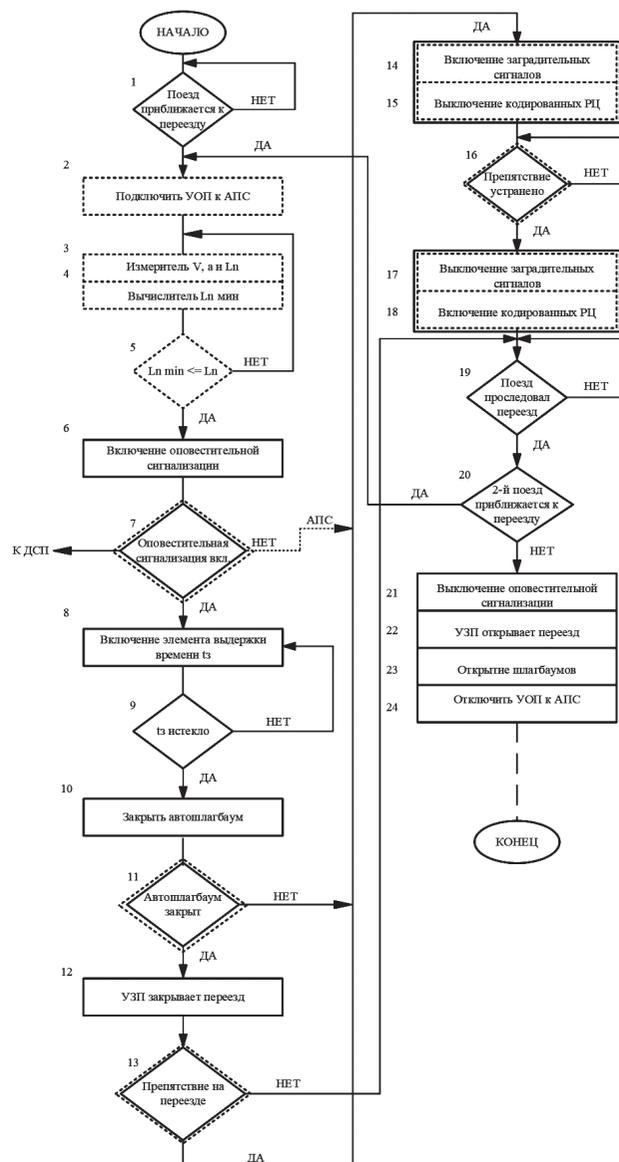


Рис. 1. Алгоритм работы системы АПС

В результате отсутствие операций 2–5 приводит к увеличению времени простоя автотранспорта перед закрытым переездом, что приводит к снижению эффективности применения систем АПС, повышение аварийности. Кроме того, вопрос автоматизации операций 12–17 с использованием информации от операторов 7 и 11 позволил бы повысить надежность системы и безопасности движения, а также создал бы условия для снятия охраны на переездах.

В случае неисправности определенных узлов переезда из числа операций 7, 12-17, необходимо предусмотреть систему оповещения на локомотив о снижении скоростного режима и управление автоматически тормозным усилием без участия человека.

Алгоритм работы переезда с АПС основан на взаимоисключающем принципе функционирования. Путем взаимодействия переездного светофора и заградительного светофора движение автотранспорта через железнодорожный переезд разрешается только при запрещающем показании заградительного светофора, и наоборот. Такая система обеспечивает сохранение допустимого уровня опасности при использовании элементов не первого класса надежности.

В эксплуатируемых системах с АПС методы автоматического управления заграждающими устройствами на перегоне зависят от различных факторов, таких как расположение заграждающих устройств относительно входных и проходных светофоров, тип автоблокировки и особенности движения поездов (одно- или двухстороннее движение).

В результате этого разнообразия возникает множество вариантов переездных установок, отличающихся схемами управления и связью с автоблокировкой.

На сегодняшний день в российской железнодорожной системе сохраняется практика присутствия дежурных на переездах, которые выполняют ответственные функции, связанные с обеспечением безопасности движения. Однако существуют технические средства, способные обеспечить более надежную реакцию на аварийные ситуации [8, 9].

На данный момент значительные работы проводятся в направлении создания автоматических систем контроля аварийных ситуаций (КАС) на переездах. Эти системы предназначены для обнаружения препятствий на пути движения поезда, таких как разрушенные автомобили, и предоставляют соответствующую информацию подвижному составу [10, 11].

В настоящее время проводятся испытания различных систем обнаружения препятствий, начиная от сложных радарных систем на скоростных участках и заканчивая более простыми устройствами с индукционными шлейфами, уложенными под покрытием дороги. Применение этих систем способствует значительному повышению эффективности работы заграждающих устройств и созданию условий для перевода определенной части переездов в категорию неохраняемых [12].

Одной из нерешенных задач является увязка автоматизации на железнодорожных переездах с текущей скоростью

движения поезда по участку приближения к переезду [13]. На практике переезд закрывается с учетом расчетной, максимально допустимой скорости. Что приводит к увеличению времени закрытого переезда в 2-5 раз. [14].

2. Метод формирования извещения, учитывающий координату подвижной единицы

Одним из способов минимизации времени закрытого состояния переездов в процессе управления заграждающими устройствами предлагается метод непрерывного отслеживания координаты, скорости движения поезда на участке приближения. С учетом возможного ускорения поезда и с расчетом времени закрытия переезда для оптимального срабатывания заграждающих устройств [15].

Авторами в работе [16] рассматривался принцип определения координаты поезда, основанный на принципе измерения изменения величины напряжения и тока рельсовой линии, однако предложенный принцип имеет следующие недостатки, что обуславливает погрешности в измерениях:

- изоляционные свойства рельсовой линии зависят от состояния изоляции рельса от шпал;
- сопротивление РЦ ниже чем 1 Ом·км, из-за неудовлетворительного состояния переездного настила, постоянного засорения и загрязнения проезжей части автодорог переездов и не возможности интенсивного испарения влаги под настилами;
- увеличение скоростей движения приводит к увеличению участков извещения и к неустойчивой работе РЦ;
- изменение погодных условий.

Однако вместо предлагаемых параметров могут быть использованы и другие, которые будут определяться типом используемых датчиков о приближении поезда. А также более точным измерением параметров рельсовой линии, что позволит более точно определить место положение поезда.

В качестве признака определения поезда на участке приближения предлагается использовать вибрацию рельсовой линии, которая возникает при движении поезда. Одним из устройств, способных контролировать ее наличие, является акселерометр.

Для определения координаты и скорости поезда используется уравнение координаты поезда, которое использует измеренные сигналы виброскорости и виброускорения на участке измерения.

При этом возможна организация контроля движения поезда, путем установки акселерометров на определенном расстоянии вдоль рельсовой линии [17].

Как известно [18], величина виброускорения связана с виброскоростью следующим соотношением:

$$a(t) = \frac{dV}{dt} = -\omega^2 D \sin(\omega t),$$

где V – виброскорость;

ω – угловая циклическая частота;

D – максимальное смещение.

По значению $a(t)$ возможно определение движения поезда в некоторой зоне контроля

$$a_{cp}^k = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T |a_{T(k-1)+i}|$$

По характеру изменения функции a_{cp}^k возможно не только контролировать наличие поезда в зоне действия датчика, но и определять количество прошедших вагонов.

Техническая реализация данного принципа заключается в непрерывном измерении акселерометром виброперемещений рельсовой линии. При постоянном измерении значений виброскорости (V) и виброускорения (a) у границы переезда, формируется множество измеренных значений V_i и a_i . С использованием этих значений составляется система уравнений координаты расположения поезда, правая часть которой приравнивается к значениям координат поезда. Решая таким образом систему уравнений

$$X_{ni} = \sum_{j=1}^n C_j f(V_{ij}, a_{ij}), i = 1, 2, \dots, n,$$

где X_{ni} – координаты расположения поезда, при которых измерены V_{ij} и a_{ij} , определяют коэффициенты уравнения координаты поезда; затем, измеряя текущее значение виброскорости и виброускорения, определяют текущую координату поезда на участке приближения

$$X_n = \sum_{j=1}^n C_j f(V_1, a_1),$$

где $C = C_1/C_n$ – априорно определенные решением системы коэффициенты уравнения координаты поезда;

$f(V_1, a_1)$ – ортогональный полином, позволяющий интерполировать кривую координаты поезда;

V_1, a_1 – аргументы ортогонального полинома – текущие, измеряемые информационные признаки, зависящие от координаты поезда;

Скорость поезда на участке определяют по формуле:

$$V_n = \frac{X_n - X_{n(i-1)}}{\Delta t},$$

где X_n – текущая координата поезда;

$X_{n(i-1)}$ – предыдущая координата, пройденная поездом за время Δt и с учетом возможного его ускорения.

Фактическую координату закрытия переезда определяют по формуле:

$$X_{3i} = I_{yn} - \left(V_n t_3^n + \frac{a_{pi} (t_3^n)^2}{2} \right), i = 1, 2, \dots, n,$$

где I_{yn} – длина участка приближения к переезду;

t_3^n – время, необходимое для закрытия переезда (табличное значение);

a_{pi} – ускорение движения поезда на участке приближения, вычисляемое по кривой скорости поезда для конкретного переезда.

Применение представленных операций дает следующие возможности для достижения поставленной задачи:

- обеспечивается непрерывное определение координаты и скорости поезда с использованием предложенного уравнения координаты поезда;

- определение направления движения поезда;

- обеспечивается непрерывное определение координаты поезда при которой необходимо закрыть переезд с учетом возможного ускорения поезда при приближении;

Таким образом, в работе получил дальнейшее развитие метод формирования извещения на переезд с учетом фактического нахождения поезда, а также скорости и ускорения его приближения к месту пересечения железнодорожной и автомобильной магистралей.

Заключение

Диапазон скоростей на большинстве железнодорожных магистралей очень широкий, однако большинство поездов, движущихся по этим маршрутам, передвигаются с небольшой скоростью. В связи с этим возникают дополнительные задержки в автотранспортном потоке около закрытых железнодорожных переездов. Интересно отметить, что длительное закрытие переезда до прибытия поезда значительно снижает безопасность дорожного движения, поскольку водители автомобилей начинают сомневаться в работоспособности ограждающих устройств. По статистике, в течение года теряется несколько тысяч автомобиле-часов на переездах средней интенсивности движения из-за избыточного оповещения о приближении поездов. Фактические задержки автотранспорта на переездах, закрытых для движения, значительно превышают прогнозируемые из-за увеличения расстояний приближения.

С увеличением интенсивности и скорости железнодорожного и автомобильного транспорта, переезды становятся все более опасными для людей и техники. Хотя развязки в разных уровнях широко используются на местах пересечения дорог с высокой интенсивностью движения, они не могут быть введены повсеместно из-за ограничений местных условий и требований в отношении капитальных затрат. Поэтому повышение безопасности и проходимости переездов становится актуальной задачей. Существующие системы ограждения в этом отношении не являются оптимальными и требуют значительных усовершенствований.

При фиксированной длине участка приближения фактическое время оповещения обратно пропорционально скорости поезда и может значительно превышать минимально необходимое время. Излишнее время оповещения может повлечь за собой негативные последствия, что требует решения.

Проведенное исследование показало, что существующие системы формирования извещения к железнодорожным переездам в пределах станции, как правило, заблаговременно включают ограждающие устройства. Что может привести к излишнему простоям

автотранспорта перед переездом. При регулярном длительном закрытом состоянии переезда водители будут стараться ускорить процесс пересечения переезда при включении заградительных сигналов, что может привести к аварийной ситуации, столкновению поезда и автотранспортного средства.

Совершенствование средств формирования извещения, уменьшение времени срабатывания заградительных устройств до расчетного времени позволит сократить простой автотранспорта и нервозность водителей, что снизит количество пересечения переездов в закрытом состоянии и, как следствие, уменьшит аварийность на железнодорожных переездах.

Библиографический список

1. Ura.ru. Информационное агентство. URL: <https://ura.news/news/1052892415> (дата обращения: 04.02.2025).
2. Шматченко В.В., Меремсон Ю.Я., Иванов В.Г. Специфика безопасности движения на железнодорожных переездах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 1. С. 143-154. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-143-154
3. Трунаев А.М. Иваницкая И.Л. Анализ средств обеспечения безопасности на железнодорожных переездах // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2021. № 63. С. 4-12.
4. Устройство заграждения железнодорожного переезда // Виртуальная библиотека Studref.com. 2019. URL: https://studref.com/557167/tehnika/ustroystvo_zagrazhdeniya_zheleznodorozhnogo_pereezda (дата обращения: 10.02.2025).
5. Устройства безопасности на переездах // Персональный сайт Дениса Игоревича Карелина. 2023. URL: <http://www.caredenis.ru/resources/srd/html/les08.html> (дата обращения 10.02.2025).
6. Рубцова М.В. Прокурорский надзор за исполнением законов в сфере обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах // Современная наука. 2021. № 3. С. 16-20. DOI: 10.53039/2079-4401.2021.5.3.003
7. Методические указания по проектированию автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте И-276-00. Расчет параметров работы переездной сигнализации. МПС России, 2000.
8. Сацюк А.В., Воевода Е.Г. Система автоматического контроля безопасности на железнодорожных переездах // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2024. № 2(73). С. 39-45.
9. Комплексная система защиты переездов / Е.В. Михайлов, Д.С. Татарникова, Н.С. Татарникова [и др.] // Молодая наука Сибири. 2018. № 2(2). С. 17-25.
10. Патент на полезную модель № 193496 U1 Российская Федерация, МПК В61L 29/24. Устройство управления системой защиты железнодорожных переездов : № 2019117851 : заявл. 06.06.2019 : опубл. 30.10.2019 / С.А. Виноградов, А.С. Виноградов, А.С. Мельников.

11. Патент № 2774478 С1 Российская Федерация, МПК В61L 29/00. Способ предупреждения аварийного выезда автомобильного транспорта на неохраняемый железнодорожный переезд : № 2021139295 : заявл. 28.12.2021 : опубл. 21.06.2022 / В.А. Питов.

12. Повышение безопасности на железнодорожных переездах посредством видеофиксации препятствий в зоне переезда с передачей сигнала машинисту / А.Н. Евстифеева, Л.Д. Любушкина, И.А. Петикова, В.А. Надежкин // XLIX Самарская областная студенческая научная конференция : Тезисы докладов, Самара, 10–21 апреля 2023 года. С-Пб: ООО «Эко-Вектор», 2023. С. 94-95.

13. Балугев Н. Н. Возможные направления развития устройств автоматики на переездах // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 12. С. 25-27.

14. Трунаев А.М., Чепцов М.Н., Радковский С.А. Синтез математической модели управления процессом функционирования железнодорожных переездов на основе новых способов формирования извещений // Информатика и кибернетика. 2019. № 4(18). С. 22-28.

15. Тарасов Е.М., Тарасова А.Е. Автоматизированная система определения координаты поезда с самонастройкой решающей функции // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32. № 3. С. 437-459. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202203.437-459.

16. Патент RU 2281219С1. Способ управления автоматической переездной сигнализацией / Тарасов Е.М. Заявл. 02.14.2004. Опубл. 08.10.2006.

17. Путьевой вибрационный датчик контроля наличия и определения параметров подвижных единиц // 36. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту / Трунаев А.М., Радковский С.А., Чепцов М.Н., Бойник А.Б. Донецьк: ДонІЗТ, 2012. Вип. 32. С. 73–78.

18. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

References

1. [Russian Railways revealed plans to upgrade regional commuter trains]. (accessed 04.02.2025). Available at: <https://ura.news/news/1052892415>. (in Russ.)
2. Shmatchenko V.V., Meremson Ya.Ya., Ivanov V.G. Traffic safety specifics on rail crossings. *Proceedings of Petersburg Transport University* 2022;19(1):143-154. (in Russ.) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-143-154.
3. Trunaev A.M., Ivanitskaya I.L. Analysis of safety measures at level crossings. *Collection of research papers of the Donetsk Railway Transport Institute* 2021;63:4-12. (in Russ.)
4. Level crossing safety barrier. Studref.com. (accessed 10.02.2025). Available at: https://studref.com/557167/tehnika/ustroystvo_zagrazhdeniya_zheleznodorozhnogo_pereezda.
5. [Level crossing safety systems]. [Denis Karelin's personal website]. (accessed 10.02.2025). Available at: <http://www.caredenis.ru/resources/srd/html/les08.html>.

6. Rubtsova M.V. Prosecutor's supervision over the implementation of laws in the field of traffic safety at railway crossings. *Sovremennaya nauka* 2012;3:16-20. (in Russ.) DOI: 10.53039/2079-4401.2021.5.3.003.

7. [Guidelines for the design of railway signalling systems I-276-00. Calculation of the operating data of a level crossing alarm system]. Ministry of Railways of Russia; 2000. (in Russ.)

8. Satsuk A.V., Voevoda Y.G. Automatic safety control system at railway crossings. *Collection of research papers of the Donetsk Railway Transport Institute* 2024;2(73):39-45. (in Russ.)

9. Mikhaylov E.V., Tatarnikova D.S. Integrated protection system of railway grade crossing. *Young Science of Siberia* 2018;2(2):17-25. (in Russ.)

10. Vinogradov S.A., Vinogradov A.S., Melnikov A.S. [Utility Model Patent No. 193496 U1 Russian Federation, IPC B61L 29/24. Railway crossing protection control device: No. 2019117851: application 06.06.2019: published 30.10.2019.] (in Russ.)

11. Pitov V.A. [Patent No. 2774478 C1 Russian Federation, IPC B61L 29/00. Method for preventing unauthorised presence of motor vehicles within unsupervised railway crossings: No. 2021139295: application 28.12.2021: published 21.06.2022]. (in Russ.)

12. Evstifeeva A.N., Liubushkina L.D., Petikova I.A., Nadiozhkin V.A. [Improving the safety of railway crossings by video-recording obstacles within such crossings and transmitting a signal to the driver]. In: Abstracts of the XLIX Samara Regional Student Scientific Conference. Samara, April 10-21; 2023. Saint Petersburg: OOO Eko-Vektor; 2023. Pp. 94-95. (in Russ.)

13. Baluiev N.N. [Possible ways forward for level crossing automation]. *Automation, Communications, Informatics* 2017;12:25-27. (in Russ.)

14. Trunaev A., Cheptsov M., Radkovsky S. Synthesis of a mathematical model for controlling the process of functioning of level crossings based on new means of generating notifications. *Informatika i kibernetika* 2019;4(18):22-28. (in Russ.)

15. Tarasov E.M., Tarasova A.E. Automated Train Coordinate Determination System with Self-Tuning of the Decision Function. *Engineering Technologies and Systems* 2022;32(3):437-459. (in Russ.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.437-459>.

16. Tarasov E.M. [Patent RU 2281219C1. A method for controlling an automatic level crossing signalling system. Application 02.14.2004. Published on 08.10.2006.]

17. Trunaev A.M., Radkovsky S.A., Cheptsov M.N., Boynik A.B. [Trackside vibration sensor for monitoring the presence and identifying the parameters of vehicles]. In: *Collection of research papers of the Donetsk Railway Transport Institute*. Donetsk: Donizt; 2012;32:73-78. (in Russ.)

18. Sergienko A.B. [Digital signal processing]. Saint Petersburg: Piter; 2002. (in Russ.)

Сведения об авторах

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

Sergey A. Radkovsky, Candidate of Engineering, Senior Lecturer, 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: serj_rsa@mail.ru.

Andrey M. Trunaev, 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 статью

Радковский С. А. – сбор и анализ исходной информации, анализ алгоритма функционирования заградительных устройств.

Трунаев А.М. – идея статьи, разработка метода формирования извещения анализ данных, анализ и получении результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Концепции обеспечения комплексной безопасности АСУ ТП верхнего уровня управления для объектов КИИ железнодорожного транспорта

Concepts for ensuring comprehensive security of upper-level ACSs of railway CII facilities

Попов П.А.¹, Розенберг Е.Н.¹, Сабанов А.Г.^{1*}, Шубинский И.Б.¹
Popov P.A.¹, Rozenberg E.N.¹, Sabanov A.G.^{1*}, Shubinsky I.B.¹

¹ АО «НИИАС», Москва, Россия

¹ JSC NIIS, Moscow, Russian Federation

* a.sabanov@vniias.ru



Попов П.А.



Розенберг Е.Н.



Сабанов А.Г.



Шубинский И.Б.

Резюме. Рассматриваются концепции обеспечения комплексной безопасности зоны управления автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом верхнего уровня и основные требования регулятора по обеспечению защиты информации. Показано, что представленные концепции не противоречат требованиям ФСТЭК России.

Abstract. The paper examines concepts associated with ensuring comprehensive security of the control area of upper-level automated railway control and management systems and the primary regulatory requirements for information protection. It is shown that the presented concepts do not contradict the requirements of the FSTEC of Russia.

Ключевые слова: комплексная безопасность, функциональная безопасность, защита информации, автоматизированные системы управления технологическими процессами железнодорожного транспорта.

Keywords: comprehensive security, functional safety, information protection, railway automated control systems.

Для цитирования: Попов П.А., Розенберг Е.Н., Сабанов А.Г., Шубинский И.Б.

Концепции обеспечения комплексной безопасности АСУ ТП верхнего уровня управления для объектов КИИ железнодорожного транспорта // Надежность. 2025. №3. С. 42-49. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-42-49>

For citation: Popov P.A., Rozenberg E.N., Sabanov A.G., Shubinsky I.B. Concepts for ensuring comprehensive security of upper-level ACSs of railway CII facilities. Dependability 2025;3: 42-49. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-42-49>

Поступила: 02.04.2025 / **После доработки:** 20.04.2025 / **К печати:** 25.07.2025

Received on: 02.04.2025 / **Revised on:** 20.04.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Введение

Автоматизированные системы управления технологическими процессами железнодорожного транспорта (АСУ ТП ЖТ) обеспечивают контроль и автоматизированное управление технологическим оборудованием, средствами, а также технологическими процессами по управлению и обеспечению безопасности перевозочного процесса. Такие системы выделяют в отдельный объект защиты, поскольку кроме требований транспортной безопасности к ним предъявляются основные положения Федерального закона № 187 как объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ). По уровню управления перевозочным процессом эти системы целесообразно разделить на следующие три зоны управления:

- низового уровня систем автоматического управления исполнительными устройствами (семафоры, стрелки, ж/д переезды и т.п.), характеризующегося отсутствием человека в замкнутой системе управления, не имеющей выхода на коммуникационные сети общего пользования;
- среднего (промежуточного) уровня;
- верхнего уровня систем управления перевозочным процессом с применением телекоммуникационных сетей общего пользования.

Обеспечение комплексной безопасности функционирования систем низового уровня рассмотрено в статье [1], в которой представлен обзор 56 стандартов, рассмотрены теоретические вопросы обеспечения функциональной безопасности, представлена концепция безопасности зоны управления перевозочным процессом низового уровня и впервые сформулированы основные принципы обеспечения безопасности. В зоне управления движением поездов низового уровня комплексная безопасность сводится к выполнению требований функциональной безопасности (ФБ). Заметим, что за время публикации рассматриваемой статьи было опубликовано еще два межгосударственных стандарта по исследуемой теме. Так, в стандарте [2] предлагается математически строго обоснованное определение уровня полноты безопасности (Safety Integrity Level, SIL) для систем механизмов и машин на основе количественного анализа рисков, которое может быть применено для систем АСУ ТП ЖТ низового уровня. Стандарт [3] содержит положения ФБ и защиты информации (ЗИ) на различных этапах жизненного цикла, оптимизацию оценки рисков, повышение эффективности действий по ЗИ и обеспечению ФБ, в том числе при проектировании, концепцию предупреждения конфликтов между функциями обеспечения функциональной безопасности и контрмерами ЗИ.

Настоящая статья является продолжением работы [1] в контексте развития теоретической модели обеспечения комплексной безопасности АСУ ТП ЖТ, включающей в себя ФБ и ЗИ. Целью данной работы является рассмотрение концепций обеспечения ФБ и

ЗИ зоны управления перевозочным процессом верхнего уровня, где требования обеспечения безопасности информации АСУ ТП ЖТ превалируют над требованиями обеспечения ФБ в силу использования сетей общего пользования, являющихся источником многочисленных и разнообразных кибератак.

1. Основные отличия систем верхнего и низового уровней управления

Приведем три наиболее существенных отличия систем верхнего и нижнего уровней управления.

Самым существенным отличием систем верхнего уровня от рассмотренных в работе [1] замкнутых систем исполнительных устройств низового уровня является наличие подключенных сетей общего пользования и значительный объем принимаемой, обрабатываемой и отправляемой информации. На верхнем уровне, как правило, находятся операторские (диспетчерские), инженерные автоматизированные рабочие места, промышленные серверы (SCADA-серверы) с установленным на них общесистемным и прикладным программным обеспечением (ПО), телекоммуникационное оборудование (коммутаторы, маршрутизаторы, межсетевые экраны, иное оборудование), а также каналы связи. Управляющая информация для среднего уровня, как правило, поступает именно с верхнего уровня.

Вторым отличием является разнообразие обрабатываемой системами АСУ ТП ЖТ информации. Если на низовом уровне входящая информация поступает с рельсовых цепей в виде небольших по объему сигналов, то системы верхнего уровня, особенно, системы интеллектуального управления движением, технического зрения, показания датчиков интернета вещей и подключаемого искусственного интеллекта характеризуются значительными массивами обрабатываемой информации. В случаях обработки информационной системой АСУ ТП ЖТ конфиденциальной информации перечень рассматриваемых угроз безопасности информации должен включать в себя угрозы утечки информации ограниченного доступа. При необходимости обеспечения целостности и конфиденциальности информации, принимаемой и обрабатываемой на верхнем уровне, применяются средства защиты информации (СЗИ) и средства криптографической защиты информации в соответствии с требованиями ФСБ России.

К третьему отличию можно отнести смену приоритетов свойств обрабатываемой системами верхнего и низового уровня информации. Если для низового уровня исполнительных устройств общепризнанно приоритеты по уменьшению значимости выстраиваются в порядке «доступность, целостность, конфиденциальность», то для систем верхнего уровня порядок обратный: конфиденциальность, целостность, доступность для уполномоченных пользователей. Для некоторых видов

управляющей информации бывает важен учет неотказуемости от авторства, достоверности, актуальности, подотчетности и т.п. Приоритетность свойств обрабатываемой информации тесно связана с обеспечением безопасности функционирования систем верхнего и нижнего уровней управления. Так, общепризнано, что нейтрализация угроз функционированию систем низового уровня управления полностью обеспечивается выполнением мер функциональной безопасности. В то же время для систем верхнего уровня управления в первую очередь важно выполнение мер ЗИ, при этом системы ЗИ не должны нарушать выполнение мер ФБ. Основные теоретические положения и требования ФБ достаточно подробно представлены в работе [1], рассмотрим требования ЗИ, поскольку для верхнего уровня управления количество угроз безопасности информации превалирует над количеством угроз, связанным с функциями безопасности движения.

2. Требования защиты информации

Требования обеспечения безопасности информации в системах АСУ ТП ЖТ в основном определяются нормативными правовыми актами ФСТЭК России. В полной мере это относится к системам верхнего уровня управления, к которым одновременно необходимо применять требования приказов ФСТЭК России № 31 для АСУ ТП и № 239 для объектов КИИ, а также приказов № 17, № 21 и методики оценки угроз безопасности информации от 05.02.2021 г. Так, в приказе № 31 определены три уровня АСУ:

- верхний уровень операторского (диспетчерского) управления;
- средний уровень автоматического управления, на котором функционируют программируемые логические контроллеры, иные технические средства с установленным ПО, получающие данные с нижнего (полевого) уровня, передающие данные на верхний уровень для принятия решения по управлению объектом и (или) процессом и формирующие управляющие команды (управляющую (командную) информацию) для исполнительных устройств, а также промышленная сеть передачи данных;
- нижний (полевой) уровень ввода/вывода данных исполнительных устройств, на котором находятся датчики, исполнительные механизмы, иные аппаратные устройства с установленными в них микропрограммами и машинными контроллерами.

Видно, что зоны управления с точки зрения ФБ, определенные во введении данной статьи, немного не совпадают с представленными в приказе № 31 уровнями. Так, низовой уровень управления системами АСУ ТП ЖТ включает в себя нижний и средний уровни, определенные в [4]. В этой зоне требования обеспечения безопасности информации, как было показано в предыдущем разделе, происходят из требований ФБ и для ПО иерархия приоритетов безопасности информации может быть представлена в виде: целостность, доступ-

ность, отсутствие уязвимостей и недеklarированных возможностей (НДВ).

Рассмотрим требования [4] регулятора к обеспечению безопасности информации АСУ ТП подробнее. При проектировании системы защиты автоматизированной системы управления должны учитываться особенности функционирования ПО и технических средств на каждом из уровней автоматизированной системы управления. В автоматизированной системе управления объектами защиты являются:

- информация (данные) о параметрах (состоянии) управляемого (контролируемого) объекта или процесса (входная (выходная) информация, управляющая (командная) информация, контрольно-измерительная информация, иная критически важная (технологическая) информация);
- программно-технический комплекс, включающий технические средства (в том числе автоматизированные рабочие места, промышленные серверы, телекоммуникационное оборудование, каналы связи, программируемые логические контроллеры, исполнительные устройства), ПО (в том числе микропрограммное, общесистемное, прикладное), а также средства ЗИ.

Организационные и технические меры ЗИ:

- должны обеспечивать доступность обрабатываемой в автоматизированной системе управления информации (исключение неправомерного блокирования информации), ее целостность (исключение неправомерного уничтожения, модифицирования информации), а также, при необходимости, конфиденциальность (исключение неправомерного доступа, копирования, предоставления или распространения информации);
- должны соотноситься с мерами по промышленной, физической, пожарной, экологической, радиационной безопасности, иными мерами по обеспечению безопасности автоматизированной системы управления и управляемого (контролируемого) объекта и (или) процесса;
- не должны оказывать отрицательного влияния на штатный режим функционирования автоматизированной системы управления.

Определение угроз безопасности информации осуществляется на каждом из уровней автоматизированной системы управления и должно включать:

- выявление источников угроз безопасности информации и оценку возможностей (потенциала) внешних и внутренних нарушителей;
- анализ возможных уязвимостей автоматизированной системы и входящих в ее состав программных и программно-аппаратных средств;
- определение возможных способов (сценариев) реализации (возникновения) угроз безопасности информации;
- оценку возможных последствий от реализации (возникновения) угроз безопасности информации, нарушения отдельных свойств безопасности информации (целостности, доступности, конфиденциальности) и автоматизированной системы управления в целом.

В качестве исходных данных при определении угроз безопасности информации используется банк данных угроз безопасности информации, ведение которого осуществляется ФСТЭК России, а также иные источники, содержащие сведения об уязвимостях и угрозах безопасности информации.

По результатам определения угроз безопасности информации могут разрабатываться рекомендации по корректировке структурно-функциональных характеристик автоматизированной системы управления, направленные на блокирование (нейтрализацию) отдельных угроз безопасности информации.

Модель угроз безопасности информации должна содержать описание автоматизированной системы управления и угроз безопасности информации для каждого из уровней автоматизированной системы управления, включающее описание возможностей нарушителей (модель нарушителя), возможных уязвимостей автоматизированной системы управления, способов (сценариев) реализации угроз безопасности информации и последствий от нарушения свойств безопасности информации (доступности, целостности, конфиденциальности) и штатного режима функционирования автоматизированной системы управления.

Рассмотрим требования регулятора к верхнему уровню управления.

На основе модели угроз на верхнем уровне управления АСУ ТП определяются меры ЗИ при информационном взаимодействии с иными автоматизированными (информационными) системами и информационно телекоммуникационными сетями, а также осуществляется проверка (в том числе при необходимости с использованием макетов или тестовой зоны) корректности функционирования автоматизированной системы управления с системой защиты и совместимости выбранных средств ЗИ с ПО и техническими средствами автоматизированной системы управления.

Наличие межсетевого взаимодействия и требование защиты от несанкционированного доступа (НСД) передающихся по сетям общего пользования команд управления движением железнодорожного транспорта накладывает дополнительные требования к обеспечению безопасности информации.

По этой причине на верхнем уровне управления количество задач ЗИ возрастает в разы относительно низового уровня. В зависимости от угроз безопасности информации и потенциальных последствий от их реализации, зачастую на первый план выходят задачи обеспечения конфиденциальности передаваемой и принимаемой информации, а задачи обеспечения доступности и целостности отступают на второй план. Цифровизация и применение новых технологий (развитие квантовых коммуникаций и использование квантового распределения ключей, техническое зрение, применение искусственного интеллекта, автоматизация управления движением без участия машиниста) усложняет задачи ЗИ. К тому же почти все сертифици-

цированные СЗИ не удовлетворяют требованиям ОАО «РЖД» в части температурных режимов, вибростойкости, электромагнитной совместимости и др. В итоге в ОАО «РЖД» разрабатываются специализированные СЗИ, примером является линейка продуктов с общим названием ТИТАН.

Таким образом, в связи с ростом количества угроз информации при переходе от низового уровня до верхнего уровня существенно увеличивается и количество задач обеспечения безопасности информации. На верхнем уровне количество задач ЗИ превалирует над задачами функциональной безопасности. Тем не менее, установка любых СЗИ на верхнем уровне не должна оказывать значительного снижения эффективности функций безопасности.

На промежуточном (среднем) уровне соотношение предметных областей и задач ФБ и обеспечения безопасности информации также определяется из анализа актуальных угроз.

3. Концепции обеспечения безопасности верхнего уровня управления

3.1 Концепция взаимозависимости предметных областей функциональной и информационной безопасности

Рассмотрим вопрос взаимозависимости зон ответственности ФБ и информационной безопасности (ИБ) с использованием материалов, представленных в стандарте [5].

Соотношение предметных областей ФБ и ИБ и рассматриваемого стандарта представлено на рис. 1.



Рис. 1. Соотношение предметных областей ФБ и ИБ [5].

Рассмотрим, какие функции безопасности являются общими в решении задач ФБ и ИБ. Минимальный набор требований ЗИ для общей области ФБ и ИБ для низовых систем (условно – до уровня диспетчерской централизации), которые работают в автоматическом режиме без связи с общедоступными сетями передачи

данных (ОбТН), на основе анализа стандартов по ФБ выделен в работе [1].

На верхнем уровне взаимодействия с использованием ОбТН существенно возрастают риски, связанные с потенциальными вероятными опасными событиями нарушений безопасности информации. Для категоризированных значимых объектов КИИ (а также для объектов без категории) согласно требованиям приказа ФСТЭК России [6] базовые требования к системам АСУ ТП ЖТ как объектов КИИ независимо от категории (в том числе объектов КИИ без категории) состоят из минимального набора, базового набора и уточненного набора требований.

Минимальный набор состоит из следующих требований:

- защита от НСД;
- обеспечение целостности программ и данных;
- обеспечение доступности информации для легальных пользователей в пределах их полномочий;
- отсутствие НДВ;
- отсутствие уязвимостей.

Указанный минимальный набор требований к АСУ ТП ЖТ установлен как из требований стандартов функциональной безопасности, так и из требований действующей нормативно-правовой базы ЗИ объектов КИИ. Данный набор требований может быть представлен в виде общей предметной области для сетей ОбТН на рис. 1. Заметим, что наборы минимальных требований по ЗИ, общих для ФБ и ИБ, в замкнутых системах управления железнодорожным транспортом и системах, имеющих выход на общедоступные коммуникационные сети, практически совпадают.

Для ПО значимых объектов КИИ согласно п. 22 приказа [6] базовый набор требований шире и включает в себя следующие организационно-технические меры ЗИ:

- идентификация и аутентификация (ИАФ);
- управление доступом (УПД);
- ограничение программной среды (ОПС);
- защита машинных носителей информации (ЗНИ);
- аудит безопасности (АУД);
- антивирусная защита (АВЗ);
- предотвращение вторжений (компьютерных атак) (СОВ);
- обеспечение целостности (ОЦЛ);
- обеспечение доступности (ОДТ);
- защита технических средств и систем (ЗТС);
- защита информационной (автоматизированной) системы и ее компонентов (ЗИС);
- управление конфигурацией (УКФ);
- управление обновлениями ПО (ОПО);
- реагирование на инциденты ИБ (ИНЦ);
- обеспечение действий в нештатных ситуациях (ДНС).

При этом для объектов КИИ на ПО в составе СЗИ применимы положения приказа ФСТЭК России [6], указанные СЗИ должны быть сертифицированы по требованиям ФСТЭК России [7] не ниже 6 уровня доверия.

Базовый набор мер по обеспечению безопасности значимого объекта подлежит адаптации (уточнению) в соответствии с угрозами безопасности информации, применяемыми информационными технологиями и особенностями функционирования значимого объекта. При этом из базового набора могут быть исключены меры, непосредственно связанные с информационными технологиями, не используемыми в значимом объекте, или характеристиками, не свойственными значимому объекту. В случае, если базовый набор мер не позволяет обеспечить блокирование (нейтрализацию) всех угроз безопасности информации [8], в него включаются дополнительные меры защиты. В этом случае согласно пункту 23 приказа [6] применительно к значимому объекту КИИ (определенному классу объектов) разрабатывается адаптированный набор мер защиты на основе анализа рисков, утвержденной модели угроз безопасности информации, а также категории значимости объектов КИИ ЖТ как объекта КИИ. Таким образом формируется уточненный набор мер информационной безопасности объектов КИИ ЖТ.

Требования к отсутствию уязвимостей и НДВ в АСУ ТП ЖТ задают через уровень доверия на основе модели угроз безопасности информации и категории значимости объектов КИИ ЖТ как объекта КИИ, определяемого в соответствии с Федеральным законом 187-ФЗ, Постановлением Правительства Российской Федерации от 14.11.2023 № 1912 и приказом ФСТЭК России [6].

Как правило, в практической деятельности внедрение мер ИБ осуществляется на этапе опытной эксплуатации системы. В случае, когда набор мер по ЗИ, определенный на основе модели угроз, не обеспечивает блокирование (нейтрализацию) всех угроз безопасности информации объектов КИИ ЖТ, должны применяться меры и соответствующие им дополнительные, наложенные СЗИ, отвечающие требованиям как ФБ, так и ИБ. При этом должна проводиться оценка влияния СЗИ на все необходимые функции безопасности системы. В таком случае для объектов КИИ ЖТ с реализованным набором мер безопасности должно быть разработано доказательство безопасности [9].

3.2 Концепция защищенной среды

Чтобы правильно понять рассмотренную в предыдущем разделе и представленную на рис. 1 общую область для предметных областей ФБ и ИБ, рассмотрим предложенную в [5] концепцию «защищенной среды». Защищенная среда, представленная на рис. 2, включает в себя набор мер ЗИ, необходимых для обеспечения эффективной защиты среды при выполнении функций безопасности системой ФБ. Однако эти меры защиты не ограничиваются лишь защитой функций безопасности.

Защищенная среда включает (но этим не ограничивается) следующие меры ЗИ:

- меры ЗИ, защищающие периметры защищенной среды;

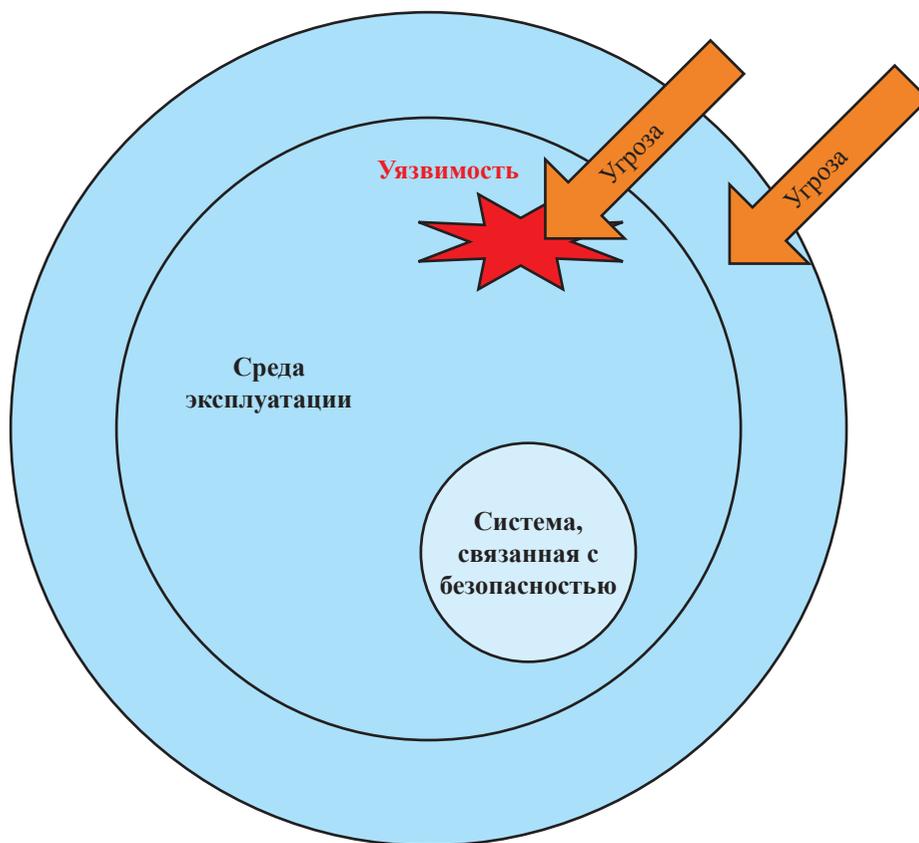


Рис. 2. Защищенная среда [5]

- меры ЗИ, касающиеся взаимодействия между различными функциональными элементами в защищенной среде;
- меры ЗИ, применяемые в функциональных элементах в защищенной среде.

При этом на практике меры ЗИ могут охватывать не только функции безопасности. В зависимости от актуальности угроз безопасности информации защищенная среда может быть построена по принципу «шелонирующей обороны» для достижения достаточной устойчивости приложений от внешних воздействий.

Меры ЗИ в защищенной среде могут быть интегрированы в любой функциональный элемент технической системы, включая функциональный элемент системы, связанной с безопасностью. В качестве мер ЗИ для защищенной среды могут быть определены одна или несколько зон.

Для предотвращения влияющих на функции безопасности и использующих уязвимости угроз от НСД или ошибок персонала защищенную среду необходимо сформировать и поддерживать.

На рис. 2 показаны взаимосвязи между защищенной средой, средой эксплуатации и системой, связанной с безопасностью.

3.3 Концепция единой модели угроз

Логичным развитием концепции защищенной среды представляется разработка единой модели угроз,

включающей в себя как угрозы невыполнения заданных функций безопасности по требованиям ФБ, так и угрозы нарушения безопасности информации.

Построение модели угроз наиболее эффективно, когда в ней учитываются наиболее актуальные риски. Для выявления и классификации рисков их оценку можно рассматривать на уровне системы, охватывая как вопросы информационной безопасности, так и вопросы функциональной безопасности. Процессы оценки рисков (ФБ) и оценки рисков-угроз (ИБ) являются схожими, поскольку в обоих случаях предполагается учитывать последствия угроз и/или отказов. Однако по ряду аспектов они различаются. Например, вероятность того, что злоумышленники воспользуются уязвимостью, не детерминирована и может быть оценена только качественно на основе накопленного опыта. Характеристики ЗИ, как правило, также невозможно определить количественно.

Оценка рисков ФБ и ИБ должна соответствовать требованиям ГОСТ 33433, ГОСТ Р 51901, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005 с применением методов оценки рисков ГОСТ Р 31010. Все действия по оценке рисков и разработке единой модели угроз в областях ФБ и ИБ могут выполняться независимо отдельными группами специалистов, но лучше, если они объединены одной общей командой. При этом эксперты по ФБ и эксперты по ИБ должны пытаться достичь согласия и работать сообща.

3.4 Основопологающие принципы

В работе [5] содержится ряд рекомендаций, сформулированных в виде основополагающих принципов. Модернизируем эти принципы для верхнего уровня управления АСУ ТП ЖТ, дополнив их учетом обеспечения безопасности перевозочного процесса.

Принцип 1. Выполнение заданных функций безопасности. Безопасность перевозочного процесса обеспечивается бесперебойным функционированием автоматизированной системы управления в штатном режиме, при котором обеспечивается соблюдение проектных пределов значений параметров выполнения целевых функций безопасности автоматизированной системы управления в условиях воздействия угроз безопасности информации. Согласно [4] применяемые меры ЗИ не должны оказывать отрицательного влияния на штатный режим функционирования автоматизированной системы управления.

Принцип 2. ЗИ в реализациях систем, связанных с безопасностью. Меры ЗИ должны эффективно предотвращать и/или защищать от негативного влияния угроз системы ФБ и реализуемые ими функции безопасности. Оценки функций безопасности должны учитывать допущение о наличии эффективных мер ЗИ.

Принцип 3. Защита реализаций систем ИБ. Меры обеспечения ФБ не должны оказывать негативное влияние на эффективность реализации мер ЗИ. При этом человеческий фактор учитывается как в предметной области ФБ, так и в предметной области ЗИ.

Принцип 4. Совместимость реализаций. Средства реализации ЗИ и средства реализации системы ФБ не должны оказывать негативного влияния на функционирование друг друга. Если рассматривать снижение уровня рисков, реализуемое системами ФБ и ИБ, то заранее определенного предпочтения между ними, как правило, не существует [5].

Видно, что представленные принципы не противоречат основным положениям приказов № 31 и № 239 ФСТЭК России. Рассмотренные принципы фактически детализируют известный подход по учету требований ИБ на ранних стадиях проектирования, известный как Secure by Design.

Заключение

Рассмотрены основные отличия верхнего уровня управления АСУ ТП ЖТ от низового уровня, а также разницу в подходах к определению уровней управления АСУ ТП общего назначения, рассмотренных в приказе № 31 ФСТЭК России, от АСУ ТП железнодорожного транспорта. Рассмотрены проблемы обеспечения комплексной безопасности в АСУ ТП ЖТ верхнего уровня управления и требования регулятора к ЗИ. Представлены концепции безопасности зоны управления перевозочным процессом верхнего уровня. Показано, что представленные концепции не противоречат требованиям ФСТЭК России.

Данная работа рассматривается в качестве подготовки материала для научно обоснованной разработки стандартов, объединяющих требования функциональной и информационной безопасности к АСУ ТП ЖТ.

Список литературы

1. Комплексная безопасность АСУ ТП объектов КИИ железнодорожного транспорта / П.А. Попов, Е.Н. Розенберг, А.Г. Сабанов, И.Б. Шубинский // Надежность. 2024. № 4. С. 48-57. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-4
2. ГОСТ Р 71454-2024/IEC TR 63161:2022 Назначение требований к полноте безопасности. Обоснование. М.: Российский институт стандартизации, 2024. IV, 36 с.
3. ГОСТ Р 71452-2024/IEC/PAS 63325:2020. Требования к функциональной безопасности и защите системы контроля промышленной автоматизации (IACS) на протяжении жизненного цикла. М.: Российский институт стандартизации, 2024. IV, 12 с.
4. Требования к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и окружающей природной среды, утвержденные приказом ФСТЭК России от 14.03.2014 № 31.
5. ГОСТ Р 59505-2021 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Основные принципы обеспечения функциональной безопасности и защиты информации. М.: Стандартинформ, 2021. IV, 28 с.
6. Требования по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, утвержденные приказом ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239.
7. Требования по безопасности информации, устанавливающие уровни доверия к средствам технической защиты информации и средствам обеспечения безопасности информационных технологий, утвержденные приказом ФСТЭК России от 02.06.2020 № 76.
8. Надеждин Ю.М. Безопасность АСУ ТП критически важных объектов // Системы безопасности. 2014. № 2. С. 34–39.
9. ГОСТ 33432-2015 Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта.

References

1. Popov P.A., Rozenberg E.N., Sabanov A.G., Shubinsky I.B. Integrated Safety of ACS of Railway CII Facilities. *Dependability* 2024;24(4):48-57. (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57>.
2. GOST R 71454-2024/IEC TR 63161:2022. Assignment of a safety integrity requirements. Basic rationale. Moscow: Russian Standardization Institute; 2024. (in Russ.)

3. GOST R 71452-2024/IEC/PAS 63325:2020. Lifecycle requirements for functional safety and security for IACS. Moscow: Russian Standardization Institute; 2024. (in Russ.)

4. [Information security requirements for automated process management systems at critical facilities, potentially hazardous facilities, as well as facilities that pose an increased danger to human life and health and the environment approved by order of the FSTEC of Russia dated 14.03.2014 No. 31.] (in Russ.)

5. GOST R 59505-2019. Industrial-process measurement, control and automation. Framework for functional safety and security. Moscow: Standartinform; 2021. (in Russ.)

6. [Safety requirements for significant facilities of critical information infrastructure of the Russian Federation approved by the order of the FSTEC of Russia dated December 25.12.2017 No. 239]. (in Russ.)

7. [Information security requirements that define the levels of trust to the information security and information technology protection tools approved by order of the FSTEC of Russia dated 02.06.2020 No. 76]. (in Russ.)

8. Nadezhdin Yu.M. Security of critical facility PCS. *Security and Safety* 2014;2:34-39. (in Russ.)

9. GOST 33432-2015. Functional safety. Policy and program of safety provision. Safety proof of the railway objects.

Сведения об авторах

Попов Павел Александрович – кандидат технических наук, заместитель Генерального директора – директор Санкт-Петербургского филиала АО «НИИАС» Москва Российская Федерация, e-mail: P.Popov@vniias.ru

Розенберг Ефим Наумович – профессор, доктор технических наук, первый заместитель Генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, e-mail: info@vniias.ru

Сабанов Алексей Геннадьевич – доцент, доктор технических наук, главный эксперт научно-технического комплекса «Технологии информационного общества» АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, e-mail: asabanov@mail.ru

Шубинский Игорь Борисович – профессор, доктор технических наук, эксперт Научного совета при Совете Безопасности РФ, главный эксперт АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

About the authors

Pavel A. Popov, Candidate of Engineering, Deputy Director General, Director, Saint Petersburg Branch, JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: P.Popov@vniias.ru.

Efim N. Rozenberg, Professor, Doctor of Engineering, First Deputy Director General, JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: info@vniias.ru.

Alexey G. Sabanov, Associate Professor, Doctor of Engineering, Chief Expert, Information Society Technologies Integrated Research and Development Unit, JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: asabanov@mail.ru.

Igor B. Shubinsky, Professor, Doctor of Engineering, Expert, Scientific Council under the Security Council of the Russian Federation, Chief Expert, JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Попов П.А. – функционирование АСУ ТП ЖТ.

Розенберг Е.Н. – постановка задачи.

Сабанов А.Г. – задачи ИБ, анализ стандартов.

Шубинский И.Б. – функциональная надежность и функциональная безопасность АСУ ТП ЖТ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Цифровой испытательный стенд анализа безопасности объектов критической информационной инфраструктуры интеллектуальных систем водного транспорта

Digital testbench for security analysis of critical information infrastructure facilities of intelligent water transportation systems

Баранов Л.А.¹, Иванова Н.Д.¹, Михалевич И.Ф.^{1*}
Baranov L.A.¹, Ivanova N.D.¹, Mikhalevich I.F.^{1*}

¹Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, Москва

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

*mif-orel@mail.ru



Баранов Л.А.



Иванова Н.Д.



Михалевич И.Ф.

Резюме. Цель. Использование новых технологий в интеллектуальных системах водного транспорта (ИСВТ), сопряжено с дополнительными рисками безопасности, которые обусловлены появлением новых типов угроз. Входящие в состав ИСВТ автоматизированные системы корпоративного и технологического управления являются объектами критической информационной инфраструктуры (КИИ). Это накладывает на ИСВТ повышенные требования безопасности. Программно-аппаратные комплексы, реализующие данные решения, в настоящее время находятся в состоянии активной разработки. Во многих случаях физическое макетирование объектов ИСВТ в разумные сроки затруднительно и экономически нецелесообразно. Эффективное решение данных вопросов обеспечивают современные методы имитационного моделирования. Они позволяют создавать цифровые прототипы объектов ИСВТ и ИСВТ в целом в безопасных виртуальных средах, на что было направлено исследование, результаты которого представлены в статье. **Методы.** Использованы методы системного анализа, исследования операций, имитационного моделирования, обеспечения безопасности ИСВТ. **Результаты.** Рассмотрена эволюция имитационного моделирования и приведена терминология в данной области. Определены типовые объекты КИИ в составе ИСВТ и объекты для цифрового моделирования. Проведен анализ средств создания цифрового испытательного стенда анализа безопасности объектов КИИ ИСВТ. Приведены описание цифрового испытательного стенда анализа безопасности объектов КИИ ИСВТ и примеры функционирования. **Заключение.** Представленный в работе цифровой испытательный стенд позволяет встраивать в свою среду как существующие, так и создаваемые отечественные защищенные программно-аппаратные комплексы, решать задачи по управлению рисками безопасности функционирования объектов ИСВТ. Это обеспечивает возможность применения стенда на различных этапах жизненного цикла объектов КИИ ИСВТ. Дальнейшее развитие стенда связано с разработками цифровых двойников акваторий внутренних водных путей, отечественных программно-аппаратных комплексов объектов КИИ ИСВТ, средств защиты объектов КИИ ИСВТ от компьютерных атак и методов гибридного управления их безопасностью.

Abstract. Aim. The application of novel technologies in intelligent water transportation systems (IWTS) is associated with additional security risks that are due to the emergence of new types of threats. The automated corporate and process management systems that are part of IWTS are critical information infrastructure (CII) facilities. That imposes increased safety requirements on IWTSs. Hardware and software systems that implement such solutions are undergoing active development. In many cases, physical prototyping of IWTS facilities within reasonable periods of time is difficult and economically unviable. Modern simulation methods efficiently solve the above problems. They allow creating digital prototypes of IWTSs and IWTSs proper within secure virtual environments. That represents the subject matter of this paper. **Methods.** The paper uses system analysis, operations research, simulation, and IWTS security. **Results.** The authors examine the evolution of simulation and provide subject-matter terminology. The paper defines standard CII facilities as part of IWTS and facilities to be digitally simulated. It analyses the tools that contribute to the creation of a digital testbench for analysing the IWTS CII security. It provides a description of the digital testbench for analysing IWTS CII security, as well as examples of its operation. **Conclusion.** The digital testbench presented in the paper allows incorporating both existing Russian secure software and hardware systems, and those under development. It also enables IWTS security risk management. That allows using the testbench at various lifecycle stages of IWTS CII facilities. Further development of the testbench

is associated with the development of digital twins of inland waterways, Russian-made software and hardware systems of IWTS CII facilities, IWTS CII computer attack protection tools and methods for hybrid security management.

Ключевые слова: автоматизированные системы корпоративного и технологического управления, имитационное моделирование, интеллектуальная система водного транспорта, компьютеризированные системы, критическая информационная инфраструктура, цифровая модель, цифровой двойник, цифровой испытательный стенд.

Keywords: automated corporate and process management systems, simulation, intelligent water transportation system, computerized systems, critical information infrastructure, digital model, digital twin, digital testbench.

Для цитирования: Баранов Л.А., Иванова Н.Д., Михалевиц И.Ф. Цифровой испытательный стенд анализа безопасности объектов критической информационной инфраструктуры интеллектуальных систем водного транспорта // Надежность. 2025. №3. С. 50-59. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-50-59>

For citation: Baranov L.A., Ivanova N.D., Mikhalevich I.F. Digital testbench for security analysis of critical information infrastructure facilities of intelligent water transportation systems. Dependability 2025;3: 50-59. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-50-59>

Поступила: 13.02.2025 / **После доработки:** 10.05.2025 / **К печати:** 25.07.2025
Received on: 13.02.2025 / **Revised on:** 10.05.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Введение

Интеллектуальную основу морских и речных судов, портов, центров управления судами и объектами инфраструктуры водных путей, систем административного управления судоходством и иных объектов водного транспортного комплекса составляют компьютеризированные системы (КС). К ним относятся любые устройства или группы соединенных или взаимосвязанных устройств, одно или несколько из которых по команде компьютерной программы производит автоматическую обработку информации (данных). Под обработкой понимается выполнение любого действия (операции) или совокупности действий (операций) с информацией (данными), включая сбор, накопление, ввод, вывод, прием, передачу, запись, хранение, регистрацию, преобразование, отображение и т.п., совершаемых с заданной целью¹. В интеллектуальных системах водного транспорта (ИСВТ) обработка информации и данных ведется в целях корпоративного и технологического управления [1, 2]. Посредством КС реализуются новейшие информационные, телематические и телекоммуникационные технологии [3-5], технологии искусственного интеллекта (ИИ) [6-8] и связи [9-11], обеспечивающие автоматизированный поиск и выработку максимально эффективных сценариев управления объектами ИСВТ для достижения заданной мобильности населения, максимизации показателей использования водных путей, повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для судоводителей и пользователей водного транспорта.

Применение новейших технологий сопряжено с дополнительными для транспортных систем рисками

безопасности, обусловленными появлением новых типов угроз, что находит свое отражение в документах стратегического характера^{2,3,4}.

Основанные на КС автоматизированные системы корпоративного и технологического управления ИСВТ являются объектами критической информационной инфраструктуры (КИИ)⁵. Это обязывает осуществлять разработку и эксплуатацию объектов ИСВТ с соблюдением как общих [12-14], так и специальных требований безопасности КИИ⁶. Выполнение данных условий связано с использованием исключительно доверенных программно-аппаратных комплексов (ПАК)⁷, находящихся в настоящее время в состоянии активной разработки [15].

Высокая стоимость объектов ИСВТ, многообразие и сложность КС, одновременные разработка ИСВТ, доверенных технологий и ПАК оказывают существенное влияние на выбор способов проверки безопасности. Во многих случаях физическое макетирование объектов ИСВТ в разумные сроки затруднительно и экономи-

² Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года (утв. Указом Президента РФ от 10.10.2017 № 490, в редакции Указа Президента РФ от 15.02.2024 № 124).

³ Приоритетные направления научно-технологического развития (утв. Указом Президента РФ от 18.06.2024 № 529).

⁴ Перечень важнейших наукоемких технологий (утв. Указом Президента РФ от 18.06.2024 № 529).

⁵ Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ.

⁶ Требования по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (утв. приказом ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239).

⁷ Правила перехода субъектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации на преимущественное применение доверенных программно-аппаратных комплексов на принадлежащих им значимых объектах критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (утв. постановлением Правительства РФ от 14.11.2023 № 1912).

¹ ГОСТ Р 51583-2014. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения.

чески нецелесообразно [16-17]. Решение данных вопросов, особенно на ранних этапах жизненного цикла, обеспечивают современные методы имитационного моделирования (ИМ), позволяющие создавать цифровые прототипы объектов ИСВТ и ИСВТ в целом в безопасных виртуальных средах при соблюдении ГОСТ¹ и требований регуляторов^{2,3}.

1. Основные понятия

Замена физических макетов имитационными моделями [18, 19] является эффективным и хорошо зарекомендовавшим себя способом решения научно-технических задач высокого уровня сложности [20-22].

Термин «имитационное моделирование» имеет множество определений, формулировки которых уточнялись по мере развития компьютерной техники. Так, в [24] ИМ определено как метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации о моделируемой системе. В [25] под ИМ понимается «соединение традиционного математического моделирования с новыми информационными технологиями, возникшими на базе ЭВМ. В [26] ИМ определено как метод исследования, основанный на том, что изучаемая динамическая система заменяется ее имитатором (подражателем), и с ним проводятся эксперименты с целью получения информации об изучаемой системе. В любом случае цель ИМ состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами. Результаты исследования имитационной модели, как правило, представляют собой оценки значений операционных (функциональных) характеристик системы, поведение которой имитируется [18].

Современные методы ИМ объединяют возможности оценки значений операционных (функциональных) характеристик системы с визуальным отображением исследуемых процессов и системы в целом. Сегодня имитационное (компьютерное) моделирование позволяет создавать «цифровых двойников» (ЦД) [27] систем, что распространяет ИМ на этапы внедрения и эксплуатации систем с использованием компьютерных моделей. Компьютерной (электронной) моделью является модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода для работы с данными⁴.

¹ ГОСТ Р 56938-2016. Защита информации. Защита информации при использовании технологий виртуализации. Общие положения.

² Требования по безопасности информации к средствам виртуализации (утв. приказом ФСТЭК России от 27.10.2022 № 187).

³ Требования по безопасности информации к средствам контейнеризации (утв. приказом ФСТЭК России от 04.07.2022 № 118).

⁴ ГОСТ Р 57412-2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.

Концепция ЦД первоначально ориентировалась на отдельные изделия. В этом случае ЦД изделия определяется как система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и (или) его составными частями⁵. Цифровой моделью (ЦМ) изделия является система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов, описывающая структуру, функциональность и поведение изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям⁵.

В дальнейшем методология ЦД распространилась на большие системы. Например, для создания ЦД сетей мобильной связи [28], акватории, океана, Земли, метавселенной [29]. Как отмечается в [30], ЦД быстро перемещаются в неосязаемую сферу процессов и абстрактных идей. Прогнозируется, что их эволюция может стать интеллектуальной платформой, что позволит перейти из физического мира в виртуальный и окажет значительное влияние на эффективность и результативность различных сфер деятельности.

При этом методологические аспекты ЦД остаются неизменными. Это означает, что если речь идет о разрабатываемых или эксплуатируемых объектах ИСВТ (ИСВТ в целом), то их ЦМ должны описывать структуру, функциональность и поведение на соответствующих стадиях жизненного цикла, включая начальные. Таким образом, ЦД может быть создан в отсутствие физического объекта (системы) и далее развиваться на этапах его (ее) жизненного цикла с использованием цифрового (виртуального) испытательного стенда (ЦИС). В общем случае под ЦИС понимается система, состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения стендовых испытаний по определению количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств ЦМ (или ЦД) этого объекта⁵.

2. Типовые объекты критической информационной инфраструктуры в составе ИСВТ

Примерный состав типовых объектов КИИ ИСВТ приведен в табл. 1 (с учетом^{6,7}).

⁵ ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

⁶ Перечень типовых отраслевых объектов критической информационной инфраструктуры, функционирующих в сфере транспорта (утв. Минтранс России 15.05.2024).

⁷ Методические рекомендации по категорированию объектов критической информационной инфраструктуры, функционирующих в сфере транспорта (утв. Минтранс России 24.01.2024).

Табл. 1. Типовые объекты КИИ в составе ИСВТ

| Информационные системы | Автоматизированные системы управления | Интегрированные системы |
|--|--|---|
| обеспечения контроля деятельности морского пассажирского транспорта. | обеспечения управления деятельностью по навигационному обеспечению судоходства на морском и внутреннем водном транспорте | обеспечения комплексной автоматизации судна |
| обеспечения контроля деятельности морского и внутреннего грузового транспорта | обеспечения управление погрузочными станциями в портах | |
| обеспечения контроля судоходства в морских и прибрежных водах, включая лоцманскую проводку судов | обеспечения управления аварийно-спасательной и судоподъемной деятельностью на морском транспорте обеспечения управления ледокольными судами | |

3. Типовые объекты цифрового моделирования ИСВТ

Модель типового объекта для цифрового моделирования ИСВТ приведена на рис. 1.

Данная модель содержит КС глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), автоматической идентификационной системы (АИС), радиолокационной системы (РЛС), систем технического зрения (СТЗ) и радиосвязи, электронной картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС), автоматизированной системы управления движением (АСУД) судов и соответствующие автоматизированные рабочие места (АРМ). Представленные на рис. 1 элементы создаются в составе безэкипажных (авто-

номных) судов, а также береговых центров управления безэкипажными судами [2].

4. Анализ средств создания цифрового испытательного стенда анализа безопасности объектов КИИ ИСВТ

Целью анализа являлся выбор средства ИМ, обеспечивающего возможность одновременного запуска образов различных операционных систем (ОС) с установленным специальным программным обеспечением (СПО) реальных КС объектов ИСВТ. Результаты сравнительного анализа наиболее распространенных решений приведены в табл. 2.

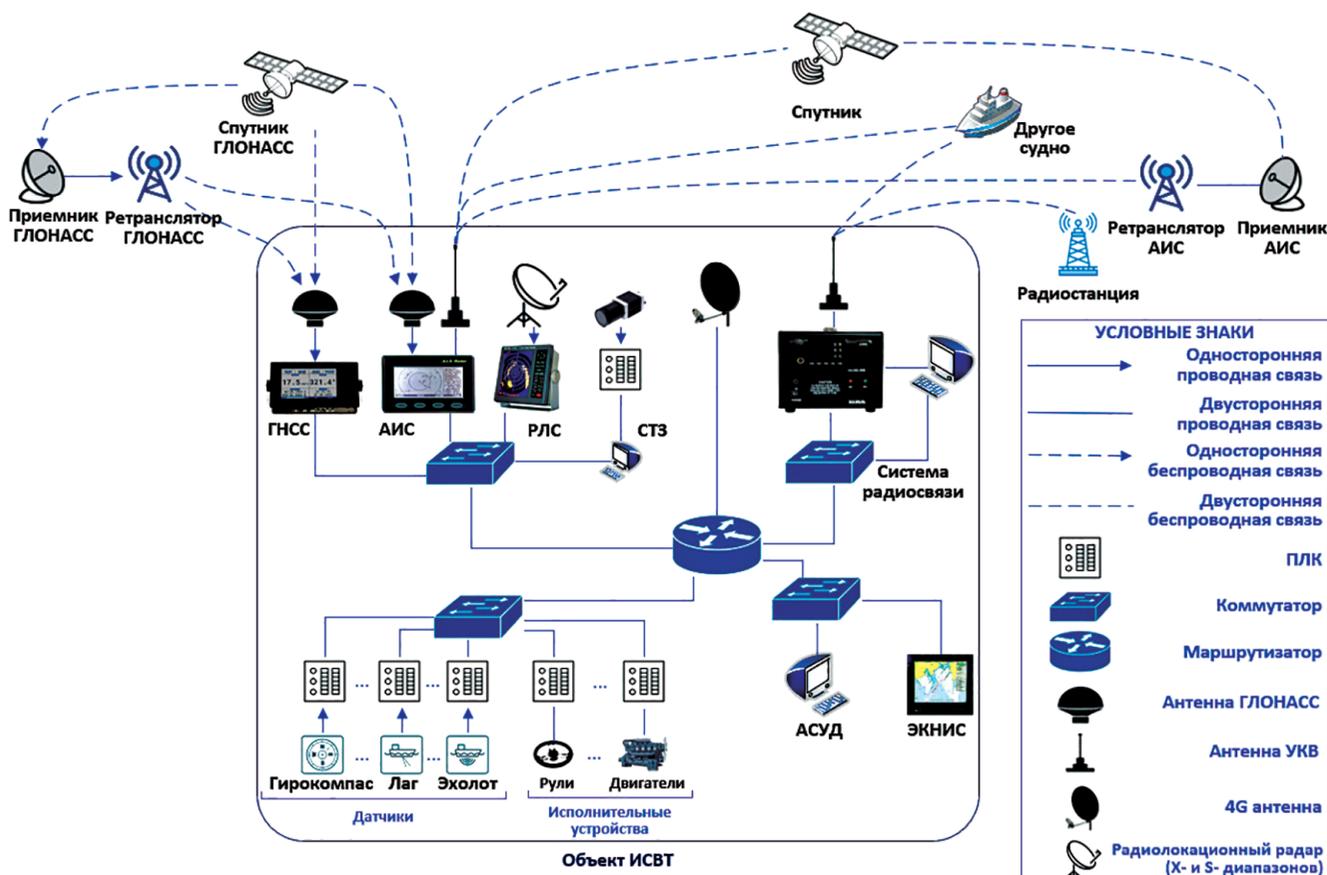


Рис. 1. Состав КС и схема информационных потоков объекта ИСВТ (пример)

Табл. 2. Средства имитационного моделирования объектов КИИ ИСВТ

| Характеристика | GNS3 ¹ | EVE-NG ² | PNETLab ³ | VIRL ⁴ | eNSP ⁵ | CPT ⁶ |
|---|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Поддержка ОС и оборудования различных производителей ⁷ | + | + | + | +/- | +/- | - |
| Производительность и масштабируемость ⁸ | + | + | + | +/- | - | + |
| Наличие свободной лицензии ⁹ | + | - | + | - | + | - |
| Поддержка сообщества пользователей ¹⁰ | + | +/- | + | - | - | +/- |
| Простота освоения | +/- | +/- | + | - | - | + |
| Возможность интеграции с реальной системой (сетью) | + | + | + | + | + | - |

¹ GNS3 (Graphical Network Simulator). <https://gns3.com/>

² EVE-NG (Emulated Virtual Environment – Next Generation). <https://www.eve-ng.net/>, <https://eve-ng.ru/>

³ PNETLab (Packet Network Emulator Tool Lab). <https://pnetlab.com/pages/main>

⁴ VIRL (Virtual Internet Routing Lab). <https://learningnetwork.cisco.com/s/virl>

⁵ eNSP (Enterprise Network Simulation Platform). <https://forum.huawei.com/enterprise/intl/en/thread/download-ensp-simulator-installation-software-here/667238396713648128?blogId=667238396713648128>

⁶ CPT (Cisco Packet Tracer). <https://www.netacad.com/learning-collections/cisco-packet-tracer?courseLang=en-US>

⁷ Обозначения: «+» – поддержка широкого спектра образов ОС и сетевых устройств; «+/-» – ограниченная совместимость с мульти-вендорными ОС и сетевыми устройствами; «-» отсутствие поддержки работы с ОС

⁸ Обозначения: «+» – высокая производительность при сравнительно малых затратах аппаратных ресурсов, моделирование сетей большого размера; «+/-» – высокая производительность при сравнительно больших затратах аппаратных ресурсов, моделирование сетей большого размера; «-» – моделирование сетей среднего и малого размеров (некоммерческая версия)

⁹ Обозначения: «+» – свободная лицензия на полноценный функционал; «-» – коммерческие продукты с ограниченным функционалом в бесплатной версии

¹⁰ «+» – имеются официальные форумы сообществ пользователей; «+/-» – имеются большие сообщества пользователей и/или обширные ресурсы для обучения; «-» – узкоспециализированные сообщества пользователей со сравнительно небольшой целевой аудиторией

Табл. 3. Состав компонентов ЦИС анализа безопасности объектов КИИ ИСВТ

| Наименование компонента | Среда функционирования компонента | СПО компонента | Функционал компонента |
|---|-----------------------------------|--|--|
| АРМ ГНСС | Windows 7 Professional | GPS Simulator ¹ NMEAsoft ² | Генерация виртуальных данных GPS. СПО ГНСС позволяет настроить маршрут, определить скорость и курс судна. Сгенерированные данные GPS можно сохранять в локальный файл и передавать по СОМ-порту или по UDP в формате сигналов NMEA0183 |
| АРМ АСУД судна | Windows 10 Professional | Advanced NMEA Monitor ³ GPS NMEA Emulator ⁴ | Мониторинг сигналов NMEA0183 от судовых навигационных устройств. СПО АСУД позволяет проводить анализ, хранение, передачу данных о движении судна в реальном времени, отображать положение ЦД судна на карте |
| АРМ ЭКНИС | Windows 7 Professional | Oziexplorer ⁵ gt-oz ⁶ | Электронная картография и навигация. В рассматриваемом далее примере в АРМ ЭКНИС загружена электронная карта с рекой Волга |
| АРМ системы гибридного управления безопасностью (ГУБ) судна | Astra Linux | Сканер-ВС ⁷ | Сканирование ЛВС объекта ИСВТ и анализ состояния его КС (активов) |
| | | Программа оценки рисков безопасности объектов КИИ ИСВТ | Оценка рисков безопасности объектов ИСВТ по методике [30] |
| Коммутатор | IOS | Cisco vIOS Switch ⁸ | Взаимодействие КС в составе ЛВС объекта ИСВТ |
| Маршрутизатор | IOS | Cisco vIOS Router ⁸ | Взаимодействие объекта с другими объектами КИИ ИСВТ |
| АРМ нарушителя ИБ | Kali Linux | Nmap | Несанкционированное сканирование ЛВС объекта ИСВТ и анализ состояния его КС (активов) |

¹ GPS Simulator. https://download.cnet.com/gps-simulator/3000-20422_4-76475761.html

² NMEAsoft. <https://download.cnet.com/developer/nmeasoft/i-10451367/>

³ Advanced NMEA Monitor. https://download.cnet.com/advanced-nmea-monitor/3000-2094_4-76570128.html

⁴ GPS NMEA Emulator. <https://github.com/niclasankar/nmea-gps-emulator>

⁵ Oziexplorer 3.95.6f. <https://www.oziexplorer4.com/eng/oziexplorer.html>

⁶ gt-oz. <https://github.com/nikolaybespalov/gt-oz>

⁷ Сканер-ВС 6. <https://scaner-vs.ru/>

⁸ ishare2. <https://github.com/pnetlabrepo/ishare2>

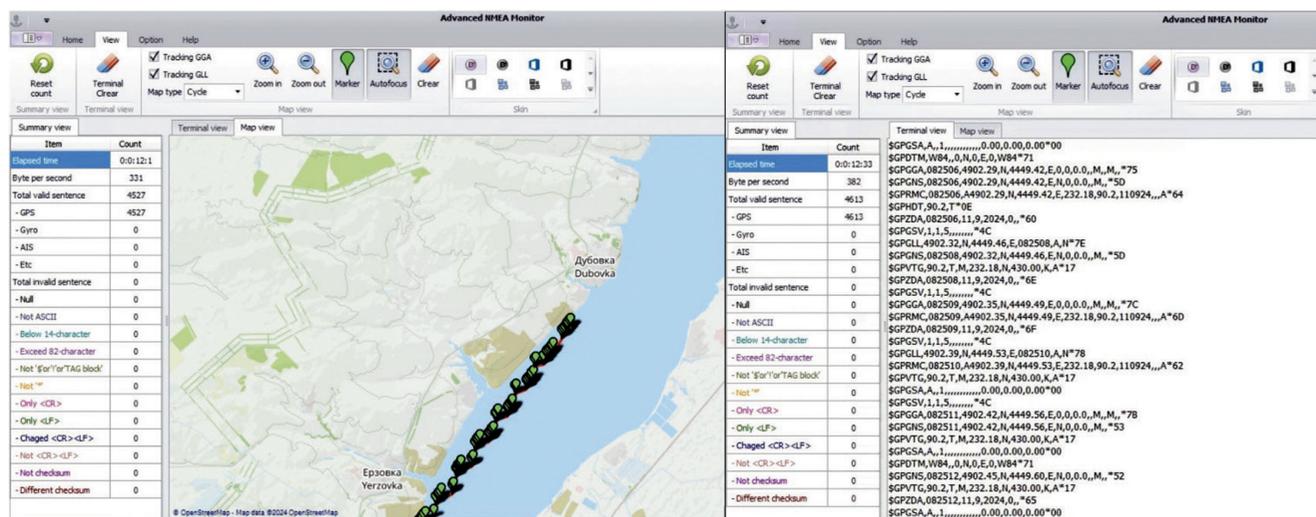


Рис. 4. Отображение информации о фактическом маршруте судна на АРМ АСУД

В состав ЦИС включены цифровые модели АСУД судна, подсистем ГНСС, ЭКНИС, системы гибридного управления безопасностью (ГУБ) судна [30] и оборудования ЛВС, ЦМ нарушителя информационной безопасности объекта ИСВТ. Работа с навигационной информацией реализована в формате протокола NMEA0183¹, обеспечивающего совместимость информации от приемников ГНСС, сонаров, радаров, компасов, барометров и других навигационных источников.

Описание и характеристика основных программных компонентов ЦИС приведены в табл. 3.

Генерируемые ЦИС данные о маршруте движения судна приведены на рис. 3. Для примера был выбран маршрут от г. Волгограда до г. Саратова вверх по реке Волга.

Генерируемая АРМ ГНСС навигационная информация передается в подсистемы ЭКНИС и АСУД судна, обрабатывается соответствующим СПО и отображается на ЦД постов управления судном (рис. 4).

На АРМ системы ГУБ судна реализована методика оценки рисков безопасности объекта КИИ ИСВТ [30], обеспечивающая автоматизированный поиск эффективных решений и интеллектуальных алгоритмов защиты объектов КИИ ИСВТ от компьютерных атак и внутренних угроз.

Заключение

Автоматизированные системы корпоративного и технологического управления ИСВТ относятся к объектам КИИ, что требует обеспечения высокого уровня безопасности и дополнительных проверок.

Представленный в работе ЦИС позволяет встраивать в свою среду как существующие, так и создаваемые отечественные защищенные программно-ап-

паратные комплексы, решать задачи по управлению рисками безопасности функционирования объектов ИСВТ. Это создает возможности применения стенда на различных этапах жизненного цикла объектов КИИ ИСВТ.

Дальнейшее развитие стенда связано с разработками ЦД акваторий внутренних водных путей [28], отечественных ПАК КИИ ИСВТ, средств защиты объектов КИИ ИСВТ от компьютерных атак и методов гибридного управления их безопасностью [30].

Список литературы

1. Михалевич И.Ф. Концептуальные проблемы транспортной безопасности водных интеллектуальных транспортных систем // Надежность. 2024. № 2. С. 72-87. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-2-72-87
2. Михалевич И.Ф. Проблемы обеспечения безопасности автономного судоходства на внутренних водных путях. М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком», 2024. 336 с.
3. Розенберг И.Н., Беляков С.Л., Боженюк А.В. и др. Методы и алгоритмы создания интеллектуальных геоинформационных систем для управления транспортными процессами. М.: ВИНТИ РАН, 2019. 292 с.
4. Amit Pundir, Sanjeev Singh, Sanjeev Singh, Manish Shailani, Manish, Geetika Jain, Saxena. Cyber-Physical Systems Enabled Transport Networks in Smart Cities: Challenges and Enabling Technologies of the New Mobility Era. January 2022. IEEE Access 10:1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3147323
5. Kul'ba V.V., Mikrin E.A., Pavlov B.V., Somov S.K. A Comprehensive Software Verification Technology for Onboard Control Systems of Spacecraft // Automation and Remote Control. 2023. Vol. 84. No. 10. Pp. 1047–1054. DOI: 10.1134/S0005117923100065
6. Kurek Wiktor, Pawlicki Marek, Pawlicka Aleksandra et al. Explainable Artificial Intelligence 101: Techniques, Applications and Challenges // ICIC 2023: Advanced

¹ National Marine Electronics Association. The NMEA 0183 Protocol. <https://web.archive.org/web/20070322070358/http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>

Intelligent Computing Technology and Applications. Pp 310–318. DOI: 10.1007/978-981-99-4752-26

7. Walter M. J., Barrett A., Tam K. A Red Teaming Framework for Securing AI in Maritime Autonomous Systems // *Applied Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 38(1). DOI: 10.1080/08839514.2024.2395750

8. Sai S, Yashvardhan U., Chamola V. et al. Generative AI for Cyber Security: Analyzing the Potential of ChatGPT, DALL-E, and Other Models for Enhancing the Security Space // In: *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 53497-53516. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3385107

9. Moya D.P. Osorio et al. Towards 6G-Enabled Internet of Vehicles: Security and Privacy // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2022. Vol. 3. Pp. 82-105. DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3143098

10. Shrestha R., Bajracharya R., Kim S. 6G Enabled Unmanned Aerial Vehicle Traffic Management: A Perspective // In: *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 91119-91136. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092039

11. Khan S.K., Shiwakoti N., Stasinopoulos P. et al. Security assessment in Vehicle-to-Everything communications with the integration of 5G and 6G networks // 2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC), Rome, Italy, 2021. Pp. 154-158. DOI: 10.1109/ISCSIC54682.2021.00037

12. Попов П.А., Розенберг Е.Н., Сабанов А.Г. и др. Комплексная безопасность АСУ ТП объектов КИИ железнодорожного транспорта // *Надежность*. 2024. № 24(4). С. 48-57. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57

13. Шубинский И.Б. Надежность, риски, безопасность систем управления на железнодорожном транспорте : монография / И.Б. Шубинский, Е.Н. Розенберг, А.В. Бочков. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 416 с.

14. Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Общие положения обоснования функциональной безопасности интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте. *Надежность*. 2023. № 3. С. 38-45. DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-3-38-45

15. Михалевич И.Ф. Проблемы создания доверенной среды разработки и реализации интеллектуальных систем водного транспорта. *Надежность*. 2025. № 2. С. 39-47. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-2-39-47>

16. Вишневецкий В.М., Рыков В.В., Козырев Д.В. и др. Моделирование надежности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ. М.: Техносфера, 2022. 194 с.

17. Willbold Johannes, Schloegel Moritz, Vogeles Manuel et al. Space Odyssey: An Experimental Software Security Analysis of Satellites. URL: <https://jwillbold.com/paper/willbold2023spaceodyssey.pdf> (дата обращения: 24.06.2025). DOI: 10.1109/SP46215.2023.10351029

18. Таха Х. Глава 17. Имитационное моделирование // Введение в исследование операций: В 2-х книгах. Кн. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 496 с.

19. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: ГУП «Издательство «Высшая школа», 2001. 343 с.

20. Tam K., Jones K. MaCRA: a model-based framework for maritime cyber-risk assessment // *WMU J Marit Affairs*. 2019. Vol. 18. Pp. 129–163. DOI: 10.1007/s13437-019-00162-2

21. Kharchenko V., Illiashenko O., Fesenko H. et al. AI Cybersecurity Assurance for Autonomous Transport Systems: Scenario, Model, and IMECA-Based Analysis // In: Dziech, A., Mees, W., Niemiec, M. (eds). *Multimedia Communications, Services and Security. MCSS 2022. Communications in Computer and Information Science*. Vol 1689. Pp 66–79. Springer, Cham, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-20215-5_6

22. Amro A., Gkioulos V. Cyber risk management for autonomous passenger ships using threat-informed defense-in-depth // *Int. J. Inf. Secur.* 2023. Vol. 22. Pp. 249–288. DOI: 10.1007/s10207-022-00638-y

23. Национальное общество имитационного моделирования России – начало пути. Интервью чл.-корр. РАН Р.М. Юсупова, директора СПИИРАН. // *CAD/CAM/CAE Observer*. 2012. Vol. 2(70) Pp. 10-18. URL: http://www.cadcamcae.lv/hot/Interview_Yusupov_n70_p10.pdf (дата обращения 12.06.2025).

24. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы. М.: Изд-во Фазис, ВЦ РАН, 2000. 144 с.

25. Киндлер Е. Языки программирования. М.: Энергоиздат, 1985. 288 с.

26. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт: Издание первое, исправленное и дополненное / Научный редактор профессор Боровков А. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.

27. Jingjing Guo, Zhiquan Liu, Siyi Tian et al. TFL-DT: A Trust Evaluation Scheme for Federated Learning in Digital Twin for Mobile Networks // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30 August 2023. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3310094

28. Розенберг И.Н., Соколов С.С., Дубчак И.А. Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов. *Мир транспорта*. 2023. № 21(6). С. 6-13. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-6-1

29. Grieves M.W. Digital Twins: Past, Present, and Future // In: *The Digital Twin*. Springer International Publishing, Cham, 2023. Pp. 97–121. DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4

30. Баранов Л.А. Нечеткая система оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта / Л.А. Баранов, Н.Д. Иванова, И.Ф. Михалевич // *Автоматика на транспорте*. 2024. Т. 10. № 1. С. 7-17. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17

References

1. Mikhalevich I.F. Conceptual problems of transportation security of intelligent water transportation systems. *Dependability* 2024;24(2):72-87. (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87>.

2. Mikhalevich I.F. [Matters of safety of autonomous navigation on inland waterways]. Moscow: Nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo «Goryachaya liniya – Telekom»; 2024. (in Russ.)
3. Rozenberg I.N., Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V. et al. [Methods and algorithms for creating intelligent geoinformation systems for managing transportation processes]. Moscow: VINITI RAS; 2019. (in Russ.)
4. Pundir A., Singh S., Shailani M., Bafila A., Saxena G.J. Cyber-Physical Systems Enabled Transport Networks in Smart Cities: Challenges and Enabling Technologies of the New Mobility Era. January 2022. *IEEE Access* 10:1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3147323.
5. Kul'ba V.V., Mikrin E.A., Pavlov B.V., Somov S.K. A Comprehensive Software Verification Technology for Onboard Control Systems of Spacecraft. *Automation and Remote Control* 2023;84(10):1047-1054. DOI: 10.1134/S0005117923100065.
6. Kurek W., Pawlicki M., Pawlicka A. et al. Explainable Artificial Intelligence 101: Techniques, Applications and Challenges. In: Proceedings of ICIC 2023: Advanced Intelligent Computing Technology and Applications. Pp 310-318. DOI: 10.1007/978-981-99-4752-26.
7. Walter M.J., Barrett A., Tam K. A Red Teaming Framework for Securing AI in Maritime Autonomous Systems. *Applied Artificial Intelligence* 2024;38(1). DOI: 10.1080/08839514.2024.2395750.
8. Sai S., Yashvardhan U., Chamola V. et al. Generative AI for Cyber Security: Analyzing the Potential of ChatGPT, DALL-E, and Other Models for Enhancing the Security Space. *IEEE Access* 2024;12:53497-53516. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3385107.
9. Moya D.P., Osorio et al. Towards 6G-Enabled Internet of Vehicles: Security and Privacy. *IEEE Open Journal of the Communications Society* 2022;3:82-105. DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3143098.
10. Shrestha R., Bajracharya R., Kim S. 6G Enabled Unmanned Aerial Vehicle Traffic Management: A Perspective. *IEEE Access* 2021;9:91119-91136. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092039.
11. Khan S.K., Shiwakoti N., Stasinopoulos P. et al. Security assessment in Vehicle-to-Everything communications with the integration of 5G and 6G networks. In: Proceedings of the 2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC), Rome, Italy, 2021. Pp. 154-158. DOI: 10.1109/ISCSIC54682.2021.00037.
12. Popov P.A., Rozenberg E.N., Sabanov A.G., Shubinsky I.B. Integrated Safety of ACS of Railway CII Facilities. *Dependability* 2024;24(4):48-57. (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-4-48-57>.
13. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N., Bochkov A.V. [Dependability, risks, safety of control systems in railway transportation]. Moscow; Vologda: Infra-Engineering; 2024. (in Russ.)
14. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. General provisions of the substantiation of functional safety of intelligent systems in railway transportation. *Dependability* 2023;23(3):38-45. (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-38-45>.
15. Mikhalevich I.F. Matters of trusted development framework creation and implementation of intelligent water transportation systems. *Dependability* 2025;25(2):39-47. (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-2-39-47>.
16. Vishnevsky V.M., Rykov V.V., Kozyrev D.V. et al. [Simulating the dependability of tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms]. Moscow: Tekhnosfera; 2022. (in Russ.)
17. Willbold J., Schloegel M., Vogeles M. et al. Space Odyssey: An Experimental Software Security Analysis of Satellites. (accessed 24.06.2025). Available at: <https://jwillbold.com/paper/willbold2023spaceodyssey.pdf> DOI: 10.1109/SP46215.2023.10351029.
18. Taha H. [Chapter 17. Simulation]. In: [Operations Research. An introduction: In 2 books. Book 2]. Moscow: Mir; 1985.
19. Sovietov B.Ya., Yakovlev S.A. [System simulation]. Moscow: GUP Izdatelstvo Vysshya shkola; 2001. (in Russ.)
20. Tam K., Jones K. MaCRA: a model-based framework for maritime cyber-risk assessment. *WMU J Marit Affairs* 2019;18:129-163. DOI: 10.1007/s13437-019-00162-2.
21. Kharchenko V., Illiashenko O., Fesenko H. et al. AI Cybersecurity Assurance for Autonomous Transport Systems: Scenario, Model, and IMECA-Based Analysis. In: Dziech A., Mees W., Niemiec M., editors. Multimedia Communications, Services and Security. MCSS 2022. Communications in Computer and Information Science. Vol 1689. Pp 66–79. Springer, Cham; 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-20215-5_6.
22. Amro A., Gkioulos V. Cyber risk management for autonomous passenger ships using threat-informed defense-in-depth. *Int. J. Inf. Secur.* 2023;22:249-288. DOI: 10.1007/s10207-022-00638-y.
23. [The National Society of Simulation of Russia. The Journey Begins. Interview with R.M. Yusupov, corresponding member, RAS, Director, SPIIRAS]. *CAD/CAM/CAE Observer* 2012;2(70):10-18. (accessed 12.06.2025). Available at: http://www.cadcamcae.lv/hot/Interview_Yusupov_n70_p10.pdf.
24. Pavlovsky Yu.N. [Simulation models and systems]. Moscow: Izdatelstvo Fazis, CC RAS; 2000. (in Russ.)
25. Kindler E. [Programming languages]. Moscow: Energoizdat; 1985. (in Russ.)
26. Prokhorov A., Lysachev M., prof. Borovkov A.M., editor. [Digital twin. Analysis, trends, global experience: First edition, revised and expanded]. Moscow: OOO AliansPrint; 2020. (in Russ.)
27. Guo J., Liu Z., Tian S. et al. TFL-DT: A Trust Evaluation Scheme for Federated Learning in Digital Twin for Mobile Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2023. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3310094.
28. Rosenberg I.N., Sokolov S.S., Dubchak I.A. Methods for Development of a Digital Twin of the Water Area for Navigation of Unmanned Vessels. *World of Trans-*

port and Transportation 2023;21(6):6-13. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>.

29. Grieves M.W. Digital Twins: Past, Present, and Future. In: *The Digital Twin*. Springer International Publishing, Cham; 2023. Pp. 97-121. DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4.

30. Baranov L.A., Ivanova N.D., Mihalevich I.F. Fuzzy system for assessing the information security risk of intelligent water transport systems. *Transport automation research* 2024;1:7-17. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17>.

Сведения об авторах

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор, Российский университет транспорта (МИИТ), заведующий кафедрой «Управление и защита информации», ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, Российская Федерация, e-mail: baranov.miiit@gmail.com

Иванова Нина Дмитриевна – Российский университет транспорта (МИИТ), аспирант кафедры «Управление и защита информации», ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, Российская Федерация, e-mail: ivanovand.nina@yandex.ru

Михалевич Игорь Феодосьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Российский университет транспорта (МИИТ), профессор кафедры «Управление и защита информации», ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, Российская Федерация, e-mail: mif-orel@mail.ru

About the authors

Leonid A. Baranov, Doctor of Engineering, Professor, Russian University of Transport (MIIT), Head of Department, Management and Protection of Information, 9, bldg 9 Obraztsova st., Moscow, Russian Federation, e-mail: baranov.miiit@gmail.com

Nina D. Ivanova, Russian University of Transport (MIIT), Post-graduate Student, Department of Management and Protection of Information, 9, bldg 9 Obraztsova st., Moscow, Russian Federation, e-mail: ivanovand.nina@yandex.ru

Igor F. Mihalevich, Doctor of Engineering, Senior Researcher, Russian University of Transport (MIIT), Professor, Department of Management and Protection of Information, 9, bldg 9 Obraztsova st., Moscow, Russian Federation, e-mail: mif-orel@mail.ru

Вклад авторов

Баранов Л.А. – постановка задачи, общее руководство.

Иванова Н.Д. – реализация ЦИС анализа рисков информационной безопасности объектов КИИ ИСВТ.

Михалевич И.Ф. – теоретические основы и прикладные методы обеспечения безопасности ИСВТ, разработка и реализация ЦИС объектов КИИ ИСВТ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование алгоритма поиска в ширину при решении задач пространственного развития инфраструктуры наземного транспорта

Using a breadth-first search algorithm in the process of spatial development of land transportation infrastructure

Кузьмин Д.В.^{1*}
Kuzmin D.V.^{1*}

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва
Russian University of Transport, Russian Federation, Moscow
*kuzminmiit@yandex.ru



Кузьмин Д.В.

Резюме. Цель. Рассмотреть вопрос применимости алгоритма поиска пути в ширину для решения задач пространственного развития линейных объектов наземной транспортной инфраструктуры. **Методы.** В статье применяется алгоритм поиска пути в графе – Поиск в ширину (Breadth-First Search, BFS), широко используемый для различных прикладных задач теории графов, в том числе трассирования и планирования пути. С данным алгоритмом проведен ряд простых экспериментов с целью определения количественных показателей его асимптотической сложности, т.е. количества выполняемых операций и времени выполнения алгоритма. Серия экспериментов имеет различную конфигурацию, определяемую направленностью поиска (однонаправленный и двунаправленный) и способом прохода ячеек (прямой и смешанный). **Выводы.** Эксперименты с различной реализацией алгоритма показывают, что двунаправленный поиск может существенным образом сократить количество выполняемых операций и время поиска. Так количество операций при двунаправленном поиске меньше в 2,75 раза при прямом и в 2,78 раза при смешанном (прямом и диагональном) проходе ячеек. Более того, сделан вывод, что применение двунаправленной реализации алгоритма имеет свою область эффективного использования. Во-первых, двунаправленный поиск эффективен в графах с высокой степенью ветвления. Сокращение количества операций при двунаправленном поиске в условиях лабиринта составляет 57,07%, а сокращение времени при этой же конфигурации эксперимента 76,92%, по сравнению с однонаправленной реализацией поиска. В среде, представляющей собой коридор и, следовательно, характеризующейся слабым ветвлением, разница в количестве выполняемых операций между двунаправленным и однонаправленным поиском составила 1,06%, а время выполнения осталось неизменным. Во-вторых, эффективность алгоритма существенно снижается при сложной структуре графа. В-третьих, для использования такой реализации необходимо иметь четкое понимание, что путь между стартовым и целевым узлом существует.

Abstract. Aim. To examine the applicability of the breadth-first path searching algorithm for spatial development of linear land transportation infrastructure facilities. **Methods.** The paper uses Breadth-First Searching, a graph path searching algorithm that is widely used as part of various graph theory applications, including path tracing and path planning. A number of simple experiments were carried out with this algorithm in order to determine the quantitative indicators of its asymptotic complexity, i.e., the number of performed operations and the algorithm execution time. The series of experiments has a different structure that is defined by the search direction (unidirectional and bidirectional) and the method of cell scanning (direct and mixed). **Conclusion.** Experiments involving various implementations of the algorithm show that bidirectional search can significantly reduce the number of performed operations and the search time. Thus, the number of operations for bidirectional search is 2.75 times less for direct and 2.78 times less for mixed (direct and diagonal) cell scanning. Moreover, it is concluded that the bidirectional implementation of the algorithm has its own scope of efficient use. First, bidirectional search is effective in highly-branched graphs. The number of operations for bidirectional maze search decreases 57.07%, while the time of the same experiment decreases 76.92% as compared to the unidirectional search. In a corridor environment that, by definition, has weak branching, the difference in the number of performed operations between bidirectional and unidirectional search was 1.06%, while the execution time remained the same. Secondly, the efficiency of the algorithm is significantly reduced when the graph structure is complex. Thirdly, using this implementation requires confidence in the fact that a path between the starting and target nodes exists.

Ключевые слова: алгоритмы поиска пути, трассирование, пространственное развитие транспортной инфраструктуры, транспортные системы, теория графов.

Keywords: pathfinding algorithms, tracing, spatial development of transportation infrastructure, transportation systems, graph theory.

Для цитирования: Кузьмин Д.В. Использование алгоритма поиска в ширину при решении задач пространственного развития инфраструктуры наземного транспорта // Надежность. 2025. №3. С. 60-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-60-67>

For citation: Kuzmin D.V. Using a breadth-first search algorithm in the process of spatial development of land transportation infrastructure. Dependability 2025;3: 60-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-60-67>

Поступила: 15.04.2025 / **После доработки:** 21.04.2025 / **К печати:** 25.07.2025

Received on: 15.04.2025 / **Revised on:** 21.04.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Введение

Пространственное развитие транспортной инфраструктуры является фундаментальной задачей организации работы и функционирования транспортных систем. Значительная часть подходов к решению данной задачи сводится к декомпозиции рассматриваемого полигона на отдельные территориальные единицы, совокупность которых, в дальнейшем рассматривается как граф. Совокупность рассматриваемых отдельных территориальных единиц, не имеющая разрывов и наложений, представляет собой растровую пространственную модель.

Под растровым моделированием пространственных данных понимают способ цифрового описания пространственных объектов и топологических отношений между ними. Описание выполняется с помощью регулярных и нерегулярных сеток, покрывающих рассматриваемый полигон. Сетка делит рассматриваемый полигон на дискретные ячейки – операционно-территориальные единицы (ОТЕ). При решении геоинформационных задач чаще используются регулярные (постоянные) сетки, в которых все ОТЕ имеют одинаковый размер, форму и т.д. Все ОТЕ содержат одинаковый набор параметров, характеризующих их пространственные свойства, т.н. атрибутивные данные, которые могут содержать информацию о топологических, гидрографических и антропогеографических и других свойствах пространства. Соединение центров ОТЕ образует граф.

Алгоритмы поиска пути в графах, такие как A*, BFS, Дейкстры, являются базовыми инструментами проектирования пространственного развития транспортной инфраструктуры, определения топологии транспортных сетей и комплексной организации работы транспортных систем.

1. Обзор источников

Растровые сетки широко используются для решения геоинформационных задач поиска пути, например для трассировок трубопроводов [1, 2], автомобильных дорог [3, 4], железных дорог [3, 5], линий электропередач [6, 7]. Логика использования растровых сеток в этом случае заключается в присвоении всем ОТЕ одинакового набора пространственных данных т.н. атрибутов. Анализируя

различными методами распределение значений атрибутов ОТЕ, исследователь может определить наилучший маршрут в рамках существующей инфраструктуры или оптимальное пространственное развитие трассы.

Растровые модели поиска имеют слабые стороны. По причине графового рассмотрения пространства (абстракция узлов и связей) возникают неизбежные искажения трассировки, например, трасса может оказаться избыточно длинной или содержать множество геометрических несовершенств. Это приводит к получению нереалистичных результатов определения пространственного развития трассы. Подробно данная проблематика рассмотрена в работе [8]. В частности отмечается, что одномерный граф является приближением к бесконечному числу трассировок в рамках рассматриваемой области пространства, поэтому неизбежны фактические расхождения между расчетной и реальной трассой. Путь, прокладываемый в растровом пространстве, имеет дискретный шаг, определяемый в том числе геометрическими свойствами формы ОТЕ. Это приводит к неизбежным удлинением и геометрическим несовершенствам трассы. Особенно явно эти негативные эффекты проявляются в неоднородных растровых пространствах. По причине существенной разницы количественных показателей атрибутивных данных путь подвержен частым изменениям направления, тогда как в условиях однородности раstra данные искажения менее выражены. [9]

2. Постановка задачи

Задача поиска пути является фундаментальной задачей теории графов, имеющей множество практических приложений. Конфигурация графа определяет возможность использования того или иного подхода в решении задачи поиска пути. Граф может иметь различные свойства: быть взвешенным или невзвешенным, ориентированным или неориентированным, регулярным и нерегулярным и т.д.

Имеется регулярный взвешенный граф:

$$G=(V,E,w),$$

где V – множество вершин;

E – множество ребер (пар вершин);

$w: E \rightarrow R^+$ – функция веса, назначающая каждому

ребру положительное число (вес). Начальная вершина $s \in V$, конечная вершина $t \in V$.

Необходимо найти путь $p=(v_0, v_1, \dots, v_k)$ в графе G таким образом, чтобы путь начинался в начальной вершине $v_0=s$, путь заканчивался в конечной вершине $v_k=t$, каждая пара соседних вершин в пути соединена ребром в графе $(v_i, v_{i+1}) \in E$ для всех $i = 0, 1, \dots, k-1$. При этом необходимо минимизировать целевую функцию – суммарный вес пути:

$$\sum_{(i=0)}^{(k-1)} w(v_i, v_{(i+1)}) \rightarrow \min.$$

В контексте задачи пространственного развития транспортной инфраструктуры, когда дискретное пространство образуется за счет множества отдельных территориальных единиц, целесообразно присваивать вес не ребру, а вершине. Такой граф называется взвешенным по вершинам (vertex-weight graph). В этом случае функция веса, отображающая каждую вершину $w: V \rightarrow R$ (или положительное число R^+).

С целью корректной оценки совокупности свойств полигона, отдельные территориальные единицы должны иметь постоянную форму и размер, следовательно, образованный граф будет регулярным. Регулярность графа заключается в том, что каждая вершина имеет одинаковую степень (одинаковое количество соседей). Степень вершины $\text{deg}(v)$ означает количество ребер инцидентных вершине v . Граф G является k -регулярным, если существует такое целое число, что $\forall v \in V: \text{deg}(v)=k$, то есть для каждой вершины v множества вершин V функция $\text{deg}(v)$, определяющая степень вершины, равна k .

3. Методы

Существует множество алгоритмов [10, 11] по поиску кратчайшего или наименее затратного пути. Большинство алгоритмов поиска пути предназначены для работы с произвольными графами, однако, регулярное дискретное пространство формирует граф в виде решетки различной геометрической формы. В зависимости от конфигурации условий решаемой задачи (ограничений поиска, равномерности стоимости пространства, вычислительных мощностей и т.д.) каждый из представленных алгоритмов имеет свою сферу эффективного использования.

Алгоритм поиска в ширину (Breadth-First Search, BFS) систематически исследует граф, начиная с заданной начальной вершины и посещая все соседние вершины, прежде чем перейти к их соседям. Первое описание алгоритма встречается в работе Эдварда Ф. Мура от 1959 г. [12]. В статье автор использовал алгоритм для поиска кратчайшего пути в лабиринте. В значительной степени данный алгоритм рассмотрен голландским программистом и математиком Эдсгером В. Дейкстрой в 1959 г. в работе [13]. Необходимо отметить, что в историческом контексте конец 1950-х годов является началом периода активного изучения проблем обхода графов.

В дальнейшем, подробно, этот и другие упомянутые в данном исследовании алгоритмы были рассмотрены множеством авторских коллективов математиков, программистов и инженеров, среди трудов которых можно выделить работы [14, 15].

Пусть имеется неориентированный граф $G=(V,E)$, где V – множество вершин, E – множество ребер $E \geq V \times V$. Также имеются начальная $s \in V$ и конечная вершины $t \in V$.

Необходимо найти путь $P=(v_0, v_1, \dots, v_k)$ от s к t , где $v_0=s$, $v_k=t$ и $(v_i, v_{i+1}) \in E$ для всех $i=0, 1, \dots, k-1$. Если пути не существует, $P = \emptyset$. Дополнительно введем следующие определения:

Множество соседей вершины u : $N(u) = \{v \in V \mid (u,v) \in E\}$;

Q : Очередь, организованная по принципу FIFO (первый пришел – первый обслужен);

Vis : Множество посещенных вершин;

$Par: V \rightarrow V \cup \{\text{null}\}$: Функция «родителя», $Par(v)$ возвращает вершину, из которой пришли в v .

На этапе инициализации формируется пустая очередь для хранения вершин, которые необходимо посетить $Q \leftarrow \emptyset$ и изначально пустое множество для хранения уже посещенных вершин $Vis \leftarrow \emptyset$. Задается начальное состояние переменной $Par(v)$ для всех вершин v множества V : $Par(v) \leftarrow \text{null}$, $\forall v \in V$, то есть инициализируется указатель (ссылка) на родителя вершины, в данном случае на этапе инициализации вершины родителя не имеют $Par(v) \leftarrow \text{null}$, $\forall v \in V$. Последнее необходимо для отслеживания структуры графа и восстановления пути.

На начальном этапе поиска стартовая вершина s добавляется в конец очереди Q , т.е. $Q.enqueue(s)$ и во множество посещенных вершин Vis , т.е. $Vis \leftarrow Vis \cup \{s\}$. При этом, так как вершина s является стартовой, она не имеет родителя $Par(s) \leftarrow \text{null}$.

Основной цикл обхода графа выполняется до тех пор, пока очередь Q не станет пустой $Q \neq \emptyset$. Первая вершина u извлекается из очереди Q , т.е. $u \leftarrow Q.dequeue()$ и если данная вершина является целевой $u=t$, то основной цикл завершается и алгоритм переходит на этап восстановления пути, описанный ниже. Если же $u \neq t$, то для каждой соседствующей с u вершине v , т.е. $v \in N(u)$ выполняется следующий цикл. Если данная вершина v не принадлежит множеству посещенных вершин Vis , т.е. $v \notin Vis$, то она добавляется в конец очереди $Q.enqueue(v)$ для дальнейшей обработки, после чего выполняется ее добавление в данное множество $Vis \leftarrow Vis \cup \{v\}$. В заключении данного цикла устанавливается связь v с родительской вершиной u , т.е. $Par(v) \leftarrow u$.

На заключительном этапе работы алгоритма выполняются операции по восстановлению пути. Если целевая вершина t не имеет родителя $Par(t)=\text{null}$, то, следовательно, пути к ней не существует $P \leftarrow \emptyset$. В противном случае инициализируется список $P \leftarrow []$ для хранения вершин пути. При программной реализации алгоритма целесообразно реализовывать данную структуру в виде списка, в который будут добавляться вершины начиная с целевой вершины t . Выбор списка, как варианта структу-

ры для хранения и организации, обусловлен спецификой добавления новых данных в список P , речь о данной специфике пойдет ниже.

Переменной $current$ которая является начальной точкой для восстановления пути, присваивается значение вершины t , т.е. $current \leftarrow t$. Вершина $current$ добавляется в начало списка P , $P.insert(0, current)$ и осуществляется переход к родителю текущей вершины $current \leftarrow \text{Par}(current)$. Цикл выполняется до тех пор, пока выполняется условие $current \neq \text{null}$, т.е. восстановление пути выполняется до тех пор, пока не будет достигнута вершина без родителя.

Блок-схема алгоритма поиска пути в ширину представлена на рис. 1.

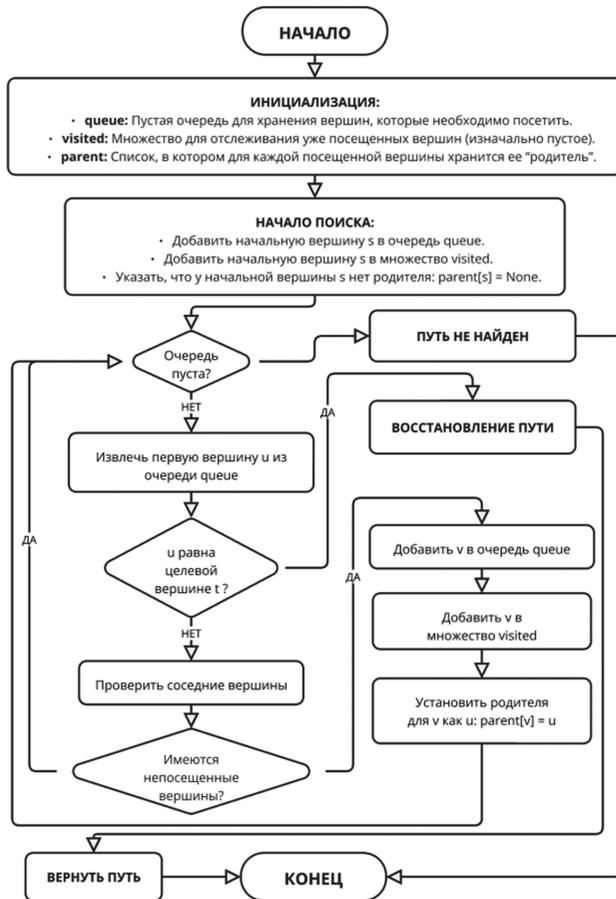
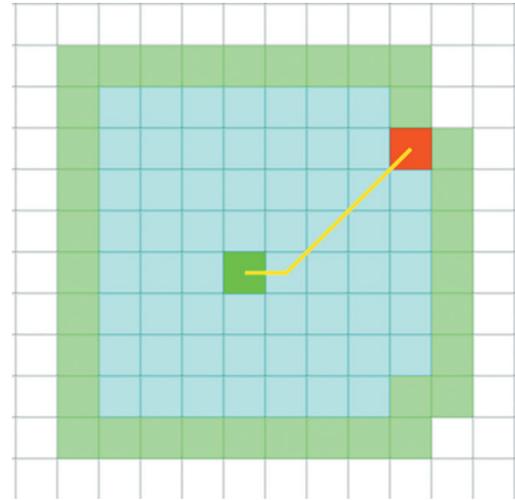


Рис. 1. Блок-схема алгоритма поиска пути в ширину

4. Обсуждение и результаты

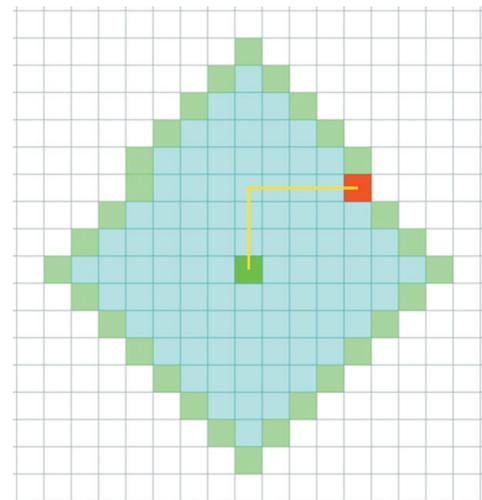
С алгоритмом была проведена серия простых экспериментов, которые конфигурировались вариантом прохода ячейки (прямой и смешанный) и направлением поиска. Среда поиска, в рамках которой осуществлялся эксперимент, с целью сравнения асимптотической сложности алгоритмов, была беспрепятственной и имела постоянные рейтинги ячеек их форму и размер. Расположение стартовой и целевой вершины также оставалось постоянным. Условные координаты стартовой вершины (0, 0), целевой (4, 3).

Визуализация результата экспериментов поиска пути алгоритмом поиска в ширину представлена на рис. 2.



а)

Длина пути – 5,24 ед., количество операций: 159, время выполнения алгоритма: 0,3 мс.



б)

Длина пути – 7 ед., количество операций: 215, время выполнения алгоритма: 0,5 мс.

Рис. 2. Визуализация результата поиска пути алгоритмом поиска в ширину (Breadth-First Search, BFS): а) реализация с возможностью диагонального и прямого прохода ячеек; б) реализация с прямым проходом ячеек. Зеленая и красная ячейки – соответственно стартовый и целевой узлы s и t . Ячейки светло-зеленого цвета – очередь Q_s ; Ячейки голубого цвета – множество посещенных вершин V_s .

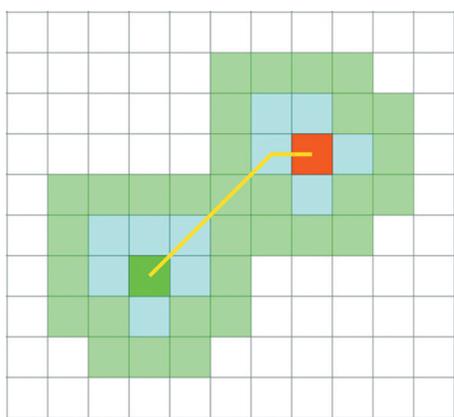
Наиболее эффективной является программная реализация вышеописанного алгоритма поиска.

Если известно, что путь между вершинами s и t существует, то данный алгоритм можно реализовать двунаправленным, т.е. поиск пути будет выполняться одновременно из стартовой и целевой вершины. В этом случае решение будет найдено быстрее, чем при однонаправленном поиске, так как волны поиска будут распространяться одновременно из двух точек.

Помимо этого, пространственная сложность графа так же сократится, так как поиском будет покрыта более компактная часть графа, что в свою очередь потребует меньшей вычислительной памяти при программной реализации алгоритма.

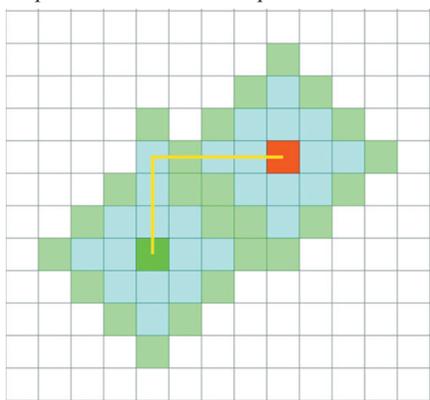
В случае двунаправленной реализации, базовый принцип работы алгоритма не изменится, однако, на этапе инициализации задублируются следующие структуры данных: очереди для хранения вершин, необходимых к посещению, для стартовой и целевой вершин Q_i и Q_s , множества посещенных вершин Vis_s и Vis_t , списки родительских вершин для поиска из s и t .

Принципиальным отличием от однонаправленного поиска является условие остановки выполнения алгоритма. Алгоритм прекращает свою работу при обнаружении вершины, посещенной обеими волнами поиска $\exists v \in V: v \in Vis_s \wedge v \in Vis_t$, т.е. существует хотя бы



а)

Длина пути – 5,24 ед., количество операций: 57, время выполнения алгоритма: 0,3 мс.



б)

Длина пути – 7 ед., количество операций: 78, время выполнения алгоритма: 0,4 мс.

Рис. 3. Визуализация результата двунаправленного поиска пути алгоритмом поиска в ширину (Breadth-First Search, BFS): а) реализация с возможностью диагонального и прямого прохода ячеек; б) реализация с прямым проходом ячеек. Зеленая и красная ячейки – соответственно стартовый и целевой узлы s и t . Ячейки светло-зеленого цвета – очереди Q_i и Q_s ; ячейки голубого цвета – множества посещенных вершин Vis_s и Vis_t .

одна вершина v графа V , принадлежащая одновременно множествам Vis_s и Vis_t . При этом важным условием реализации является равномерность распространения волн поиска, чередование поиска шагов от точек s и t .

Пример реализации двунаправленного поиска пути алгоритмом поиска в ширину приведен на рис. 3.

Проведенные эксперименты с различной реализацией алгоритма показывают, что двунаправленный поиск может существенным образом сократить количество выполняемых операций и время поиска. Так, количество операций при двунаправленном поиске меньше в 2,75 раза при прямом и в 2,78 раза при смешанном (прямом и диагональном) проходе ячеек. Инфографика с результатами проведенных экспериментов представлена на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Результаты экспериментов с различными вариантами реализации алгоритма поиска в ширину (Breadth-First Search, BFS), по показателю «Количество выполненных операций»

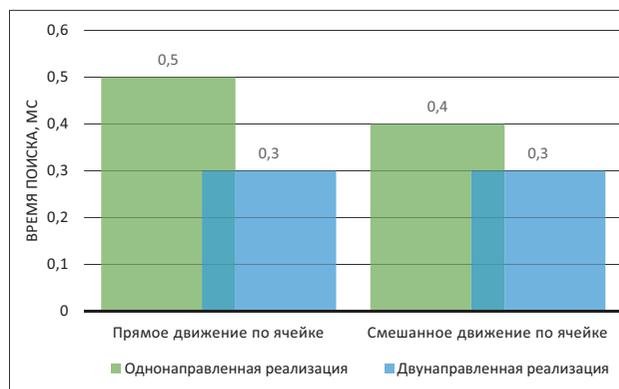
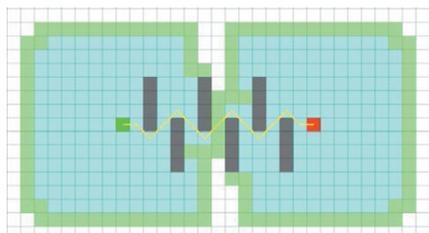
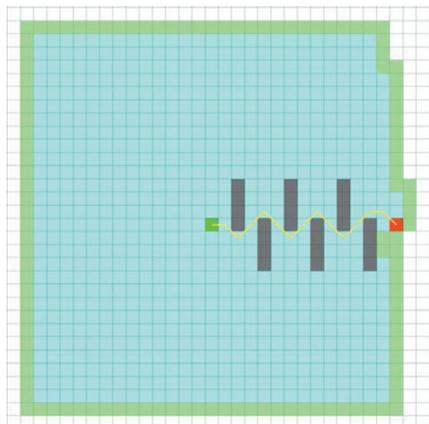


Рис. 5. Результаты экспериментов с различными вариантами реализации алгоритма поиска в ширину (Breadth-First Search, BFS), по показателю «Время поиска»

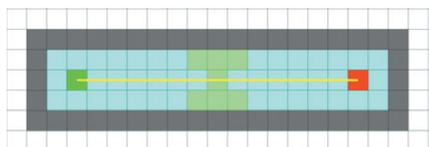
Однако стоит отметить, что применение двунаправленной реализации алгоритма имеет свою область эффективного использования. Двунаправленный поиск эффективен в графах с высокой степенью ветвления. В слабоветвящемся графе (с малым количеством ребер связи) область поиска будет расширяться линейно, оба поисковых процесса будут проходить одинаковое или близкое расстояние. Наиболее контрастным примером



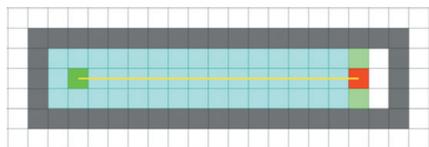
а) Длина пути – 18,97 ед., количество операций: 677,
время выполнения алгоритма: 0,3 мс



б) Длина пути – 18,97 ед., количество операций: 1577,
время выполнения алгоритма: 1,3 мс



в) Длина пути – 14 ед., количество операций: 95,
время выполнения алгоритма: 0,5 мс



г) Длина пути – 14 ед., количество операций: 94,
время выполнения алгоритма: 0,5 мс

Рис. 6. Визуализация результата экспериментов поиска пути алгоритмом поиска в ширину (Breadth-First Search, BFS) с различным ветвлением графа: а) реализация двунаправленного поиска в лабиринте; б) реализация однонаправленного поиска в лабиринте; в) реализация двунаправленного поиска в коридоре; г) реализация однонаправленного поиска в коридоре. Зеленая и красная ячейки – соответственно стартовый и целевой узлы s и t . Ячейки светло-зеленого цвета – очереди Q_s и Q_t ; ячейки голубого цвета – множества посещенных вершин Vis_s и Vis_t .

является пример поиска пути в лабиринте. Если лабиринт имеет множество путей (граф лабиринта сильно ветвится), то эффективность двустороннего поиска выше, так как выше вероятность более скорой встречи двух фронтов поиска. Если же лабиринт представляет собой прямой коридор, то двусторонний поиск не даст большого преимущества.

Докажем данное утверждение, проведя серию экспериментов. Во всех экспериментах стартовая и целевая вершины имеют постоянное условное координатное положение $(0, 0)$ и $(14, 0)$ соответственно. В первом случае среда имеет препятствия, т.е. является условным лабиринтом, во втором случае среда беспрепятственна и представляет собой прямой коридор. Среда поиска постоянна по размеру ячеек, их форме и рейтингу. Во всех конфигурациях эксперимента используем диагонально-прямой (смешанный) проход ячеек. Визуализация эксперимента приведена на рис. 6.

Результаты эксперимента наглядно подтверждают гипотезу о том, что двунаправленный поиск более эффективен в графах с сильным ветвлением (лабиринт), чем в графах со слабым ветвлением (коридор). Количественное сравнение результатов эксперимента обобщим в табл. 1.

Сокращение количества операций при двунаправленном поиске в условиях лабиринта составляет 57,07%, а сокращение времени при этой же конфигурации эксперимента 76,92%, по сравнению с однонаправленной реализацией поиска. В среде, представляющей собой коридор и, следовательно, характеризующейся слабым ветвлением разница в количестве выполняемых операций между двунаправленным и однонаправленным поиском составила 1,06%, а время выполнения осталось неизменным. Из чего следует вывод, подтверждающий гипотезу о эффективности двунаправленного поиска в графах с сильным ветвлением. В условиях сильного ветвления двунаправленный поиск значительно сокращает область поиска и время выполнения алгоритма, тогда как в условиях слабого ветвления разница количественных оценок экспериментов практически отсутствует.

Более того, эффективность алгоритма существенно снижается при сложной структуре графа. И наконец, для использования такой реализации, необходимо иметь четкое понимание, что путь между стартовым и целевым узлом s и t существует.

Сложность алгоритма оценивается по двум параметрам: временная и пространственная сложность.

Табл. 1. Количественные оценки результатов проведенных экспериментов

| Конфигурация эксперимента | | Количество выполненных операций | Время выполнения алгоритма, мс |
|------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Характеристика среды поиска | Направление поиска | | |
| Лабиринт (сильное ветвление графа) | Однонаправленный | 1577 | 1,3 |
| | Двунаправленный | 677 | 0,3 |
| Коридор (слабое ветвление графа) | Однонаправленный | 94 | 0,5 |
| | Двунаправленный | 95 | 0,5 |

Табл. 2. Сравнение асимптотической сложности алгоритмов Поиска в ширину и Дейкстры по результатам проведенных экспериментов, показатель «Количество выполняемых операций»

| Конфигурация поиска | Поиск в ширину | Дейкстры | Сравнение Дейкстра относительно Поиска в ширину |
|-----------------------------|----------------|----------|---|
| Однонаправленный, прямой | 215 | 232 | +7,9% |
| Однонаправленный, смешанный | 159 | 205 | +28,9% |
| Двунаправленный, прямой | 78 | 86 | +10,3% |
| Двунаправленный, смешанный | 57 | 59 | +3,5% |

Временная сложность отражает зависимость скорости роста времени выполнения алгоритма от размера входных данных. Пространственная сложность отражает зависимость объема памяти от размера входных данных.

Данные характеристики выражаются *O*-нотацией, показателем, который отражает верхние границы временной или пространственной сложности алгоритма. Можно выделить несколько типов *O*-нотаций: $O(1)$ – константная сложность, алгоритм выполняется за фиксированное время, независимо от размера входных данных; $O(n)$ – линейная сложность, пропорциональное размеру входных данных; $O(n^2)$ – квадратичная сложность, время выполнения пропорционально квадрату размера входных данных и проч.

Временную сложность алгоритма поиска в ширину можно оценить следующим образом. Пусть V – количество вершин, E – количество ребер, тогда в лучшем случае алгоритм посещает каждую вершину графа один раз, т.е. это требует $O(V)$ времени. Каждая посещенная вершина имеет соседей, которые необходимо добавить в очередь для посещения и посетить. Это означает, что каждое ребро графа, будет рассмотрено минимум один раз в ориентированном и дважды в неориентированном графе. Это займет $O(E)$ времени. Так как каждая вершина и ребро посещается минимум 1 раз, то общая сложность составит $O(V + E)$. Другими словами, время выполнение алгоритма линейно зависит от количества вершин и ребер в графе.

Пространственную сложность данного алгоритма необходимо оценивать по следующим процессным составляющим, потребляющим память: очередь рассмотрения вершин, список родительских вершин, множество посещенных вершин. Рассматривая в совокупности перечисленные составляющие пространственную сложность можно оценить как $O(V)$, т.е. объем занимаемой памяти, используемый алгоритмом, линейно зависит количества вершин в графе.

Данный алгоритм в большей степени подходит для поиска кратчайшего пути (минимального количества ребер) в невзвешенном графе. Несмотря на то, что он может быть адаптирован для поиска по взвешенному графу, его использование не гарантирует нахождение кратчайшего пути по весу, в отличие, например, от алгоритма Дейкстры.

Сравнение данных алгоритмов в аспекте асимптотической сложности является предметом отдельной публикации. Исследование на эту тему уже проведено, но в силу тематики данной статьи, а также сложности

и объемности данного вопроса, автор считает нецелесообразным проведение полного критического анализ алгоритма Дейкстры в рамках данной публикации. Тем не менее, основные количественные результаты сравнения обобщены в табл. 2.

Представленный алгоритм, а также выводы и рекомендации, полученные в результате проведения экспериментов, представляют практическую ценность, так как могут являться инструментом обоснования и принятия взвешенных управленческих решений при решении задач пространственного развития линейной инфраструктуры наземного транспорта. Их использование позволяет эффективно решать задачи оптимизации трассирования новых путей в части проектирования с учетом капитальных и эксплуатационных затрат, обхода препятствий, учета ограничений и т.д.

Список литературы

1. Automatic Pipeline Route Design with Multi-Criteria Evaluation Based on Least-Cost Path Analysis and Line-Based Cartographic Simplification: A Case Study of the Mus Project in Turkey. URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/4/173> (дата обращения: 23.05.2025).
2. Kang J.Y., Lee B. Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and laplacian smoothing // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. Vol. 9.
3. Scaparra M.P., Church R.L., Medrano F.A. Corridor location: the multi-gateway shortest path model // Journal of Geographical Systems. 2014. Vol. 16. No. 3. Pp. 287-309.
4. Yu C., Lee J., Munro-Stasiuk M. Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning // International Journal of Geographical Information Science – GIS. 2003. Vol. 17.
5. Jamali A.A., Esmailian A., Mokhtarisabet S. et al. Path selection by topographic analysis: vector re-classification versus raster fuzzification as spatial multi-criteria using cost-path // Spatial Information Research. 2023. T. 31.
6. Stefano B., Davide G., Francesco O. Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts // Environmental Impact Assessment Review. 2011. Vol. 31. No. 3. Pp. 234-239.
7. Monteiro C., Ramirez-Rosado I., Miranda V. et al. GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization // Power Delivery, IEEE Transactions on. 2005. Vol. 20. Pp. 934-942.

8. Antikainen H. Comparison of Different Strategies for Determining Raster-Based Least-Cost Paths with a Minimum Amount of Distortion // *Transactions in GIS*. 2013. Vol. 17.

9. C. Dana T. Propagating radial waves of travel cost in a grid // *International Journal of Geographical Information Science*. 2010. Vol. 24(9). Pp. 1391-1413.

10. Ahuja R., Mehlhorn K., Orlin J. et al. Faster Algorithms for the Shortest Path Problem // *J. ACM*. 1990. Vol. 37. Pp. 213-223.

11. Wayahdi M., Ginting S., Syahputra D. Greedy, A-Star, and Dijkstra's Algorithms in Finding Shortest Path // *International Journal of Advances in Data and Information Systems*. 2021. Vol. 2. Pp. 45-52.

12. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze // In *Proc. International Symposium on the Theory of Switching, Part II*. Harvard University Press, 1959.

13. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numerische Mathematik*. 1959. Vol. 1. No. 1. Pp. 269-271.

14. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L. et al. *Introduction to Algorithms*. MIT Press and McGraw-Hill, 2001. 1216 p.

15. Sedgewick R., Wayne K. *Algorithms*. Addison-Wesley Professional, 2011. 971 p.

References

1. Automatic Pipeline Route Design with Multi-Criteria Evaluation Based on Least-Cost Path Analysis and Line-Based Cartographic Simplification: A Case Study of the Mus Project in Turkey. (accessed 23.05.2025). Available at: <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/4/173>.

2. Kang J.Y., Lee B. Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and laplacian smoothing. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 2017;9.

3. Scaparra M.P., Church R.L., Medrano F.A. Corridor location: the multi-gateway shortest path model. *Journal of Geographical Systems* 2014;16(3):287-309.

4. Yu C., Lee J., Munro-Stasiuk M. Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning. *International Journal of Geographical Information Science – GIS* 2003;17.

5. Jamali A.A., Esmailian A., Mokhtarisabet S. et al. Path selection by topographic analysis: vector re-classification versus raster fuzzification as spatial multi-criteria using cost-path. *Spatial Information Research* 2023;31.

6. Stefano B., Davide G., Francesco O. Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review* 2011;31(3):234-239.

7. Monteiro C., Ramirez-Rosado I., Miranda V. et al. GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 2005;20:934-942.

8. Antikainen H. Comparison of Different Strategies for Determining Raster-Based Least-Cost Paths with a Minimum Amount of Distortion. *Transactions in GIS* 2013;17.

9. C. Dana T. Propagating radial waves of travel cost in a grid. *International Journal of Geographical Information Science* 2010;24(9):1391-1413.

10. Ahuja R., Mehlhorn K., Orlin J. et al. Faster Algorithms for the Shortest Path Problem. *J. ACM* 1990;37:213-223.

11. Wayahdi M., Ginting S., Syahputra D. Greedy, A-Star, and Dijkstra's Algorithms in Finding Shortest Path. *International Journal of Advances in Data and Information Systems* 2021;2:45-52.

12. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze. In: *Proc. International Symposium on the Theory of Switching, Part II*. Harvard University Press; 1959.

13. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1959;1(1):269-271.

14. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L. et al. *Introduction to Algorithms*. MIT Press and McGraw-Hill; 2001.

15. Sedgewick R., Wayne K. *Algorithms*. Addison-Wesley Professional; 2011.

Сведения об авторе

Кузьмин Дмитрий Владимирович, Россия, г. Москва, 127994, ул. Образцова 9/9, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами», кандидат технических наук, доцент, e-mail: kuzminmiit@yandex.ru

About the author

Dmitry V. Kuzmin, 9/9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russia, Russian University of Transport, Senior Lecturer, Department of Logistics and Transportation System Management, Candidate of Engineering, Associate Professor, e-mail: kuzminmiit@yandex.ru.

Вклад автора

Исследование проведено автором самостоятельно в полном объеме: выполнен анализ современной теоретической базы поиска пути в графах; сформулирована блок-схема алгоритма поиска в ширину; проведен обзор научных исследований по данной тематике; проведена серия экспериментов по поиску пути в простых графах; обобщены и проанализированы результаты полученных экспериментов; сформулированы рекомендации по практическому применению алгоритма для решения задач поиска пути.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Моя география работ по надежности

М.А. Ястребенецкий

В 2009 году была опубликована прекрасная статья И.А. Ушакова «Откуда есть пошла надежность на Руси»¹. Через 16 лет после выхода этой статьи, возникло желание еще раз вспомнить о тех людях, о которых писал Игорь Алексеевич, подтвердить их роль в современном развитии работ по надежности (к сожалению, многие из них покинули нас). В детстве я очень любил книгу Бориса Житкова «Что я видел». К этим заметкам вполне мог бы подойти подзаголовок «кого я видел».

Слово «надежность» применительно к техническим изделиям существует с тех времен, когда эти изделия начали производить. Наверно, еще в древнем Риме мастера старались сделать свои колесницы как можно более надежными. В приказе Петра I от 11 января 1723 г. говорится о надежности ружей: «Пусть дьяки и подъячие смотрят, как олдермены клеймо ставят. Буде сомнения возьмут за душу, самим проверять и смотреть, а два ружья каждый месяц стрелять, пока не испортятся, и смекать, что делать надобно. Буде заминка в войне приключится, особливо при баталиях по нерадению дьяков и подъячих, бить оных кнутами по оголенному месту. Хозяину – 25 кнутов и пени по червонцу за каждое ружье. Старшего олдермена бить до бесчувствия, старшего дьяка отдать в унтер-офицеры, дьяка отдать в писаря, подъячьего отлучить от воскресной чарки на год». Современным языком, это называется программа обеспечения надежности, включая выборочный контроль.

За последующие 200 с лишним лет принципы обеспечения надежности не изменились, понятие надежность имело только качественный характер. Вторая мировая война была еще войной моторов. В войне в Корее (1950–1953) впервые стали широко применять автоматику и электронную технику, однако ими могли пользоваться ограниченно – большую часть времени они не работали. Необходимость обеспечения надежности военной техники обусловили создание сначала в США математической теории надежности военного оборудования; недаром первая вышедшая в СССР в 1957 г. переводная книга по надежности посвящена надежности наземного электрооборудования. В 1952 г. опубликована классическая работа нобелевского лауреата Джона фон Неймана, посвященная синтезу надежных систем из ненадежных элементов. В СССР одним из главных инициаторов работ по надежности стал акад. Аксель Иванович Берг. Он имел удивительное чутье на новое – это относилось и к радиолокации, и к кибернетике, которая в философском словаре 40-х годов называлась буржуазной лженаукой.

¹ Ушаков И.А. Откуда есть пошла надежность на Руси // Методы менеджмента качества. 2009. № 1. С. 10–13.

О Берге мне рассказал мой товарищ Леонид Шароль. Он хотел стать журналистом, познакомился с А.И. Бергом, который доверил Лёне прочитать свои дневники и он на их основе написал о Берге книгу. Но напечатать ее не разрешили – адмирал Берг был ранее зам. министра обороны, начинен разными тайнами. Первая книга о Берге вышла значительно позже.

Первые в СССР работы по надежности начались применительно к военной технике, в частности, в Ленинграде – к военно-морской технике. Одним из основоположников работ по надежности корабельного оборудования был контр-адмирал проф. Игорь Алексеевич Рябинин, начальник кафедры Ленинградской Военно-морской академии. Не могу не отметить, что юнгой он был участником парада Победы в 1945 г. Много лет я встречался с ним в Ленинграде. Тем, кто занимался надежностью в СССР, несказанно повезло: вопросами надежности сразу же заинтересовались крупнейшие в мире советские математики – специалисты по теории вероятностей, включая заведующего кафедрой теории вероятностей МГУ акад. Бориса Владимировича Гнеденко. Была создана советская школа по теории надежности не только Москве и в Ленинграде, но и в Киеве, Харькове, Риге, Минске, Баку, Тбилиси, Иркутске, Владивостоке и ряде других городов (табл. 1).

В отличие от военной техники, работы по надежности приборов и средств автоматизации промышленного назначения до 1962 г. в СССР не проводились.

Как начались наши работы по надежности. Я заканчивал очную аспирантуру во Всесоюзном Центральном научно-исследовательском институте комплексной автоматизации (ЦНИИКА) в Москве, когда в 1960 г. директор ЦНИИКА предложил мне создать новое подразделение этого института в Харькове и там продолжить мою работу по анализу динамических характеристик автоматических регуляторов. Предложение было вызвано общей тенденцией создания периферийных подразделений ЦНИИКА как головного института по автоматизации технологических процессов в различных городах страны. С желанием быть самостоятельным, я согласился на это предложение. И в 1961 г. начала функционировать группа, перешедшая затем в лабораторию и отдел ЦНИИКА в Харькове.



Игорь Алексеевич
Рябинин
(1925-2018)

Табл. 1. Представители школ надежности в СССР

| Россия | | |
|------------------|---|--|
| Москва | Гнеденко Б.В., Соловьев А.Д., Беляев Ю.К., Чепурин Е.В., Димитров Б. | Московский государственный университет им. Ломоносова |
| | Ушаков И.А. | КБ Лавочкина, НИИ автоматической аппаратуры, ВЦ АН СССР, Московский физико-технический институт |
| | Каштанов В.А. | Московский институт электронного машиностроения |
| | Рыков В.В. | ЦНИИКА, Московский институт нефтехимической и газовой промышленности, Университет дружбы народов им. Лумумбы |
| | Дружинин Г.В. | Военно-воздушная инженерная академия им. Жуковского, МИИТ |
| | Сотсков Б.С., Волик Б.Г., Декабрун И.Е., Пархоменко П.П. | Институт проблем управления АН СССР |
| | Грабовецкий В.П. | Радиотехнический институт им. Минца |
| | Ринкус Э.К., Малевинский Г.В. | Всесоюзный теплотехнический институт |
| | Бруевич Н.Г. | Институт проблем машиностроения АН СССР |
| | Генис Я.Г., Хвилевичский Л.О. | ЦНИИКА |
| Ленинград | Маликов И.М. | Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ) |
| | Половко А.М. | Военно-космическая академия им. Можайского, Ленинградская лесотехническая академия |
| | Рябинин И.А. | Военно-морская академия им. Кузнецова |
| | Губинский А.И. | Высшее военно-морское инженерное училище |
| | Шубинский И.Б. | Пушкинское высшее училище радиоэлектроники, Ленинградская лесотехническая академия |
| | Черкесов Г.Н. | Ленинградский политехнический институт |
| | Седакин Н.М. | Военно-космическая академия им. Можайского |
| | Падерно П.И. | ЛЭТИ |
| Иркутск | Руденко Ю.Н. | Сибирский энергетический институт АН СССР |
| Владивосток | Абрамов О.В. | Институт автоматики и процессов управления АН СССР |
| Обнинск | Острейковский В.А. | Обнинский институт атомной энергии |
| Свердловск | Смагин Д.В., Раменская Г.П., Гринфельд Р.Н. | Свердловэнерго |
| Украина | | |
| Киев | Коваленко И.Н. | Институт кибернетики АН Украины |
| | Шишонок Н.А., Креденцер Б.П., Сенцкий С., Ластовченко М. | Киевское высшее инженерное радиотехническое училище |
| | Заренин Ю.Г., Шишонок Н.А. | Киевский Институт автоматики |
| | Королюк В.С., Турбин А.Ф. | Институт математики АН Украины |
| Харьков | Ястребенецкий М.А., Гольдрин В.М., Соляник Б.Л., Спектор Л.И., Розен Ю.В. | Харьковское отделение ЦНИИКА |
| | Ларин А.А. | Харьковское высшее военное командное училище |
| | Шукайло В.Ф. | Украинский заочный политехнический институт |
| Латвия | | |
| Рига | Кордонский Х.Б., Герцбах И.Б., Андронов А.М., Парамонов Ю.М., Яцкив И.В. | Рижский институт инженеров гражданской авиации |
| | Скляревич К.Н., Левин В.И., Маргулис А.М. | Институт электроники и вычислительной техники АН Латвии |
| Азербайджан | | |
| Баку | Фархад- Заде Э. | Институт энергетики |
| Сумгаит | Киясбейли Ш.А. | НИПИНефтехимавтомат |
| Белоруссия | | |
| Минск | Пешес Л.Я., Степанова М.Д. | Институт проблем надежности и долговечности машин |
| | Широков А.М. | Минское высшее инженерное зенитно-ракетное училище |
| Казахстан | | |
| Усть-Каменогорск | Полевая Ж.Н. | Усть-Каменогорское отделение ЦНИИКА |

Начал создаваться коллектив, который существует по настоящее время, где многократно менялись:

- состав сотрудников;
- название (самое громкое было – Институт безопасности и надежности технологических систем);
- подчиненность;
- направление работ;
- помещение.

Я руководил этим коллективом с 1961 г. по 2014 г., когда передал руководство молодому сотруднику С.А. Трубчанинову, оставив себе должность главного научного сотрудника. Состав коллектива менялся, защищались диссертации, но основные сотрудники работали в течение многих лет. Наибольшая длительность работ в нашем коллективе принадлежала к.т.н. Л.И. Спектору (50 лет) и к.т.н. В.М. Гольдрину (59 лет).

Идея заниматься не только динамикой автоматических регуляторов, но и их надежностью к 1962 г. висела в воздухе, тем более такие работы ни в ЦНИИКА, ни в Министерстве приборостроения не проводились. Возник вопрос – динамические характеристики автоматических регуляторов нам известны, а какие у них характеристики надежности?



Лаборатория надежности в 1976 г.

На фото: 1-й ряд – Влад Гольдрин, Сева Нечаев, Алла Губенко; 2-й ряд – Нина Головки, Таня Алексеенкова, Лида Гарагуля, Света Виноградская, Леня Спектор.

Руководство ЦНИИКА поддержало идею заниматься надежностью, и мы приступили к этой работе. Все было абсолютно новым для нас. До появления в свет нашей классики – книги Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляева, А.Д. Соловьева¹ – оставалось 3 года. Единственно, что мы сразу правильно поняли, – это то, что надежность базируется на теории вероятностей, которую ни я, ни

¹ Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.

мои сотрудники не знали. Только на военной кафедре в ХПИ я слышал слова, относящиеся к вероятности, поскольку военная специальность была «Управление артиллерийским зенитным огнем». В трех курсах по математике в аспирантуре этой науке меня не учили.

Зато условия для работы в то время были непостижимые – нам дали почти год на подготовку к новому направлению, не требуя сразу никаких результатов. Мы пригласили читать лекции специалиста по теории вероятности из Военной Инженерной Радиотехнической Академии И.М. Сливняка специально для нашего коллектива. Нам читались лекции на математическом уровне, превышающем наши возможности. Университетский учебник по теории вероятностей Б.В. Гнеденко был тогда для нас предельным, мы пытались понять его, а затем и книги Г. Крамера и Дж. Дуба. После лекций чтение учебника Е.С. Вентцель по теории вероятностей для технических институтов доставляло просто эстетическое удовольствие – все было понятно и просто. (Тогда мы еще не знали, что Е.С. Вентцель под псевдонимом И. Грекова – не от слова «грек» а от знака «игрек» – была автором знаменитых в то время книг, которыми все зачитывались). Я только раз видел Е.С. Вентцель в 1967 г. в вестибюле московского Дома Ученых, где проводился Всесоюзный симпозиум по статистическим проблемам в технической кибернетике. Вошел красавец генерал Пугачев, ведя под руку скромно одетую пожилую даму. Тут же пошел шорох – это же сама Вентцель!

Нужно было определяться в новом для нас направлении. Надежностью чего заниматься – было понятно. Конечно, автоматическими регуляторами, которые ранее были в центре внимания нашего отдела, и с которыми мы были хорошо знакомы. Перед нами стоял вопрос – а каковы численные значения показателей надежности регуляторов? Показатели надежности ни этих регуляторов, ни какой-либо еще промышленной автоматики, не были известны. Никто даже не представлял тогда их уровень. Как определить показатели надежности – было непонятно. В качестве первого шага мы заказали оборудование для стендовых испытаний надежности. В эпоху всеобщего дефицита нам дали не то, что мы хотели, а то, что можно было достать – камеру тепла, влаги и солнечной радиации, и стенд для испытаний транспортной тряски. Пока мы это оборудование получали, стало понятно, что для определения показателей надежности оно нам не пригодится. Так оно и простояло много лет нетронутым; впрочем, тронуть оно было непутевым лаборантом, который перед уходом нацарапал свое имя на этой камере.



Михаил Анисимович Ястребенецкий в 1974 г.

Мы пошли иным путем – попробовали определить показатели надежности по результатам эксплуатации. В то время вообще было неясно, можно ли использовать данные эксплуатации для получения объективных количественных оценок надежности. В СССР (во всяком случае в промышленной автоматике и уж точно в энергетике) этого никто не делал и никакой уверенности, что получится что-то путное, не было. С 1963 г. мы начали проводить такие работы. Первым объектом исследования стали автоматические электрические регуляторы на Змиевской тепловой электростанции. Тем более, для этой станции ЦНИИКА разрабатывал информационно-вычислительные системы. Не вдаваясь в детали, скажу, что потребовался ряд мер, организационных и статистических, для получения достоверных данных о надежности. Мы сутками дежурили на станции, проводили так называемые контрольные записи – дежурили вместе со сменами и фиксировали действия персонала, обучали персонал сбору данных и обучались сами.

В этом направлении – надежность при эксплуатации – все было новым, опыт накапливался быстро и в 1968 г. мы опубликовали первую в СССР книгу по надежности промышленной автоматики¹. Небольшая книга (125 стр.) вышла в издательстве «Энергия» небывалым по нынешним временам тиражом – 14 000 экземпляров, который быстро был раскуплен. Изучение поведения действующей аппаратуры автоматики в условиях реальной эксплуатации показало, что имеющиеся математические модели их надежности не достаточны. Возникла необходимость создания новых моделей, которые учитывают реальную ситуацию.

Полученные результаты в течение 1969-1974 гг. были опубликованы в академических журналах, в том числе 5 статей в самом престижном в то время журнале «Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика», известном тщательным рецензированием и жестким отбором статей. Кроме того, были опубликованы статьи в киевском журнале «Кибернетика» (одна из них – в соавторстве с моим товарищем по ЦНИИКА В.В. Рыковым²), и статьи в журнале «Автоматика и телемеханика» Все эти статьи были переведены на английский язык и изданы за границей. Новые модели были описаны в следующей книге³.

Затем стало ясно, что данные по эксплуатационной надежности могут быть широко использованы для совершенствования эксплуатации автоматики. Здесь мы ограничились сначала тепловыми электростанциями.

¹ Ястребенецкий М.А., Соляник Б.Л. Определение надежности аппаратуры промышленной автоматики в условиях эксплуатации / Ред. О.Г. Журавлев. М.: Энергия, 1968. 130 с. (Библиотека по автоматике; выпуск 281).

² Рыков В.В., Ястребенецкий М.А. О регенерирующих процессах с несколькими типами состояний регенерации // Кибернетика. 1971. № 3. С. 82–86. Киев.

³ Ястребенецкий М.А., Соляник Б.Л. Надежность промышленных автоматических систем в условиях эксплуатации. Поток отказов и методы их статистической обработки / Ред. В.В. Рыков. М.: Энергия, 1978. 168 с.

Нашли единомышленников (вернее, они нашли нас) на Урале, в «Свердловэнерго» – второй по мощности энергосистеме в СССР. Это были сотрудники Службы тепловой автоматики и измерений «Свердловэнерго» – ее начальник Д.В. Смагин, его заместитель Р.Н. Гринфельд и главный мотор в этой работе – Г.П. Раменская. Цель была – уменьшить трудозатраты персонала цехов тепловой автоматики и измерений, не снижая при этом надежность. Для того, чтобы установить периодичность профилактического технического обслуживания автоматики, было принято и реализовано (причем не только в «Свердловэнерго», но и в близлежащих энергосистемах – «Пермьэнерго» и «Башкирэнерго») смелое решение – вообще не проводить в течение времени техническое обслуживание, а потом посмотреть, что из этого получилось: где, что, как часто нужно делать с аппаратурой.

Количество аппаратуры, над которой был поставлен этот эксперимент, было весьма большим – около 7500, а суммарная длительность испытаний – около 80 млн приборо-часов. В работе участвовали и организации Министерства энергетики и электрификации – Всесоюзный теплотехнический институт и трест ОРГРЭС. В результате работ были разработаны новые нормы технического обслуживания и капитальных ремонтов средств автоматизации, а затем нормативы номенклатуры и количества запасных частей. После апробации эти нормы были утверждены Министерством энергетики и электрификации СССР для всех тепловых электростанций страны. Например, периодичность капитальных ремонтов автоматики увеличена с двух до четырех лет, что дало существенный эффект.

Школа Б.В. Гнеденко по надежности. Вышедшая в 1965 г. книга Б.В. Гнеденко, А.Д. Соловьева, Ю.К. Беляева (см. ¹) стала классической как для меня, так и для специалистов по надежности во всем мире. До 1970 г. я видел Бориса Владимировича Гнеденко (далее – Б.В.) только издали, на трибунах конференций и семинаров. Летом 1970 г. я получил приглашение для участия во Всесоюзном совещании – школе по теории массового обслуживания, организованного Московским Государственным университетом (МГУ) под руководством Б.В. Хорошо помню день и место своего знакомства с Б.В. День – 2 октября 1970 г., место – Дом творчества композиторов, в красивейшем курортном городке Дилижан в Армении. Пожалуй, более яркого и интересного совещания у меня в жизни не было. Музыка непрерывно звучала из открытых окон коттеджей. На школу были приглашены как корифеи из МГУ – уже ставший корифеем Игорь Ушаков, так и молодежь приблизительно одного возраста, которая начинала работать в области надежности и массовом обслуживании: Александр Андронов, Степан Броди, Боян Димитров, Илья Герцбах, Виктор Каштанов, Владимир Рыков, Михаил Федоткин и др. Многие из них стали моими товарищами на всю жизнь. На меня обрушилась масса новых впечатлений, новых идей.

Доброжелательность Б.В., внимание к молодежи, желание помочь разобраться в неясных до того математических задачах были поразительны. Я не предполагал выступать на этой школе, и предложение Б.В. выступить с докладом было для меня неожиданным. Еще более неожиданным стало предложение Б.В. быть руководителем одного из заседаний школы. Со школы в Дилижане началось мое знакомство и с А.Д. Соловьевым – непрекаемым авторитетом в теории надежности, который в дальнейшем сыграл большую роль в моей жизни.

А на школах, организованных Б.В., мне еще дважды доводилось бывать: в Пушино на Оке и на курорте в Азербайджане с захватывающим названием Загульба.

Затем последовал семинар в МГУ, проводимый Б.В. и обсуждение на нем моей докторской диссертации. Оппонентами в 1974 г. по рекомендации Б.В. были члены его команды – А.Д. Соловьев и И.А. Ушаков. К сожалению, защита диссертации в ученом совете Харьковского Политехнического института была не последним этапом прохождения диссертации. В начале 1975 г., сразу же после защиты моей докторской диссертации¹, началась, так называемая, перестройка Высшей Аттестационной Комиссии (ВАК). Старые советы были распущены, новые еще не созданы. Общее правило «закон не имеет обратной силы» было проигнорировано: диссертации, которые были защищены по старым требованиям, имевшим место до реформы ВАК, должны были быть оценены по новым требованиям. Я уже не говорю, что новые требования сначала не были даже сформулированы – защищенные по старым требованиям диссертации, включая мою, просто пылились в ВАК и ждали новых требований. Даже фамилия нового председателя ВАК звучала угрожающе – Кириллов-Угрюмов, напоминая персонажей Салтыкова-Щедрина.

В итоге через год после защиты 3 декабря 1975 г. я получил разгромный отзыв неизвестного так называемого «черного» оппонента. В коротком сугубо отрицательном отзыве в частности говорилось: «Исчерпывающее решение указанная проблематика получила в работе Ю.К. Беляева в журнале «Теория вероятностей и ее применение». Автор ограничивается в своей работе формулами, которые можно найти в указанной работе или легко получить как их следствие». Далее «Рассматриваемая автором полумарковская модель имеет весьма узкую область применения. Чтобы снять ограничения, накладываемые полумарковской моделью, некоторые авторы ввели и исследовали процессы более общего типа (И.И. Ежов, А.В. Скороход в журнале «Теория вероятностей и ее применение»)». Почему оппонент сослался именно на эти статьи – непонятно, это были чисто математические работы, написанные на ином математическом уровне и не связанные с моими результатами. В мою защиту выступи-

ли те, на кого сослался черный оппонент – Ю.К. Беляев, И.И. Ежов с А.В. Скороходом, написавшие письма в ВАК. Меня вызвали в экспертный совет ВАК, я ответил на все вопросы, решил, что уже все в порядке.

Но ВАК отправил диссертацию на перезащиту в МВТУ им. Баумана, где работу, докладываемую в тот же день непосредственно передо мной, отклонили. На перезащиту поехали втроем, совместно с лидерами школы Б.В. – А.Д. Соловьевым и И.А. Ушаковым. В перезащите было две части. В первой, открытой, был заслушан мой доклад. Вопросы задавали профессора Г.К. Круг, В.В. Солодовников, П.С. Матвеев, Н.Т. Кузовков, Е.П. Попов и др., все вопросы были по делу, все проходило спокойно. Оппонентом от Совета был проф. Ю.А. Рязанов. По правилам, на перезащите разрешались выступления одного оппонента. Полагаю, что логике и авторитету А.Д. Соловьева в Совете противостоять было невозможно. И.А. Ушаков находился в резерве. Закрытая часть проходила без меня и моих оппонентов. Потом я получил стенограмму этой части. В ней выступали проф. В.В. Липаев – специалист по надежности программного обеспечения, проф. Г.Г. Бебенин – специалист по системам управления полетом и председатель Совета чл.-корр. АН СССР Е.П. Попов. Не могу не процитировать фрагмент из выступления Г.Г. Бебенина: «Нет сомнений относительно оригинальности теоретических материалов – в «Технической кибернетике» иначе не поместят. Можно в одной статье что-либо уточнить, добавить. Но нельзя же поместить столько работ, не содержащих ничего нового. А зачем использовать чужие, если у него получены свои оригинальные результаты. У меня впечатление, что отрицательный отзыв несерьезный». Результаты голосования были 17:2 в мою пользу.

В числе отличных идей И.А. Ушакова было создание объединения коллег, работающих в области теории надежности, а также безопасности, анализа риска и близких приложений. Эта идея была реализована И.А. Ушаковым и А.В. Бочковым в 2000 г., объединение в честь Б.В. получило название «Гнеденко-Форум». Мне была доверена большая честь быть президентом «Гнеденко-Форума» с 2014 г. по 2020 г. после Вау Куо – президента городского университета Гонконга и перед учеником Б.В. – Бояном Димитровым – профессором Кетеринг Университета (США).

Сейчас, глядя на книги Б.В., подписанные у меня дома, и на свою книгу по надежности систем управления технологическими процессами, вышедшую в Москве в 1982 г. с предисловием Б.В., я думаю о том, что мне в жизни очень повезло – работать с Борисом Владимировичем Гнеденко и его учениками.

Семинары, конференции, совещания по надежности. У всех этих мероприятий частым местом проведения был Ленинград, где ими руководили И.А. Рябинин и А.М. Половко. Ленинград был местом, где в 1968 г. было мое первое выступление по надежности на конференции «Надежность приборов, средств автоматизации и систем управления».

¹ Ястребенецкий М.А. Надежность общепромышленных автоматических систем и средств управления: (Методы и результаты исследования при эксплуатации): Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук / Харьк. политехн. ин-т им. В.И. Ленина. – Харьков, 1974. – 38 с.



Участники семинара Ю.Н. Руденко на юге Байкала в 1980 г.

На фото: ряд 1 справа – Н. Воропай (директор СЭИ после Ю.Н. Руденко), я рядом, ряд 2 слева 3-й- Ю.Н. Руденко, ряд 3 слева 2-й- И.А.Ушаков, рядом В.П.Грабовецкий

Самым долгоживущим является международный научный семинар имени Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», проводимый Сибирским энергетическим институтом (СЭИ) АН СССР. В 2024 г. состоялось 96 (!) заседание этого семинара. Академик Ю.Н. Руденко был директором СЭИ, а потом академиком – секретарем отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР, автором совместно с И.А. Ушаковым книги по надежности систем энергетики. Семинар собирает специалистов по надежности в различных отраслях энергетики и не только в энергетике.

Интересными и масштабными мероприятиями со всех точек зрения – по количеству участников – более 1000, по тематике и числу докладов были Всесоюзные совещания по проблемам управления, которые организовывали Академия наук СССР и Институт проблем управления (ИПУ). На всех этих совещаниях была секция надежности и диагностики. Мне довелось выступать на этих совещаниях с 1968 г. в столицах разных союзных республик: IV Тбилиси 1968; VI Москва 1974; VII Минск 1977; VIII Таллин 1980; IX Ереван 1983; X Алма-Ата 1986; XI Ташкент 1989.

Очень интересными были пленарные заседания. На них с проблемными докладами выступали крупнейшие ученые. Приятно привести имена некоторых

знаменитых академиков-докладчиков: В.А. Трапезников («Перспективы в развитии управляющих систем»), Я.З. Цыпкин («Новые направления в теории адаптивных систем»), В.С. Пугачев (Развитие теории стохастических систем управления), В.М. Глушков («Сети ЭВМ и их использование для управления экономикой»), Б.Н. Петров («Управление космическими аппаратами»), Б.В. Раушенбах («Проблемы управления в космосе») и др.

Тенденции – разнообразия мест проведения совещаний – ИПУ придерживался не только для самых представительных совещаний по автоматическому управлению, но и по частным вопросам. Так, под руководством В.С. Пугачева проводились Всесоюзные совещания по статистическим методам управления не только в Москве (1967 г.), но в Ташкенте (1970 г.) и в Алма-Ате (1981 г.), где были секции надежности и теории массового обслуживания.

Не только ИПУ разнообразил места проведения своих совещаний. В Министерстве приборостроения был создан Совет по надежности АСУТП. В состав совета входили руководители подразделений надежности различных организаций: Ю.Г. Заренин и Н.А. Шишонков (Киевский институт автоматики), П.В. Рубинштейн (Москва, завод «Манометр»), Т.И. Лиманский (Северодонецк, НИИУВМ), Ш.А. Киясбейли (Сумгаит, НИПИ

Нефтехимавтомат), ЦНИИКА (М.А. Ястребенецкий) и др. Заседания этого Совета проводились непосредственно на предприятиях отрасли – в Северодонцке, Омске, Грозном, Киеве, Харькове, Сумгаите, Кирово-кане, Рустави и др.

В течение ряда лет я проводил в Харькове семинар по надежности в областном Доме техники, где выступали специалисты из ряда городов Советского Союза: А.Д. Соловьев, И.А. Ушаков, В.В. Рыков, В.А. Каштанов, А.И. Губинский и др. Наконец я решился пригласить на этот семинар Б.В. Гнеденко. К моей радости, на приглашение Б.В. с удовольствием согласился: «Я академик Академии наук Украины, а в Харькове – первой столице Украины – я очень давно не был». В июне 1975 г. Б.В. приехал в Харьков. Кроме постоянных участников семинара, послушать доклад Б.В. пришло множество людей-математиков, инженеров. Большой зал Дома техники был набит до отказа.

Доклад Б.В. был посвящен связи прикладной математики и теории надежности с практикой создания и эксплуатации технических систем и оборудования, в первую очередь, разрабатываемого и изготавливаемого в Харькове. Б.В. был прекрасно информирован об огромных харьковских заводах, выпускающих турбины, трактора, электродвигатели, электронное оборудование. Он даже знал о том, что в Харькове находился крупнейший в СССР танковый завод, сам факт существования которого в те времена считался секретным. У Б.В. Был удивительный и редкий талант говорить просто о сложных вещах, и в этом можно было еще раз убедиться во время его доклада.

Семинар затянулся, Б.В. было задано много вопросов, на которые он весьма подробно отвечал. После семинара пошли пешком ко мне домой, где нас среди прочего угощения ждала огромная щука. «Я – волгарь» – сказал

Б.В. и выбрал себе голову. Каков же был ужас жены и моих родителей, когда в этой голове обнаружился крючок, причем уже тогда, когда злосчастный кусок рыбы был во рту. К счастью, крючок вцепился не глубоко. «Ну, все, я теперь у Вас на крючке» – сказал Борис Владимирович. «Но этот крючок я заберу с собой на память, как доказательство того, что Вы меня поймали в Харькове на крючок».

Надежность атомных электростанций (АЭС). Работы по надежности АСУТП АЭС начались нами с начала 80-х годов и стали затем основным направлением наших действий. В это время ЦНИИКА была поручена разработка научных и инженерных методов создания АСУТП АЭС с реакторами различных видов. Нашей задачей была разработка научных основ и методов обеспечения надежности АСУТП АЭС и работы по тем системам, которые разрабатывал наш институт.

Основной станцией, на которой мы проводили работы, была Запорожская АЭС (ЗАЭС). Темпы, с которой строилась ЗАЭС, были непостижимыми ни для того, ни для настоящего времени. В конце 1984 г. был введен в эксплуатацию 1-й энергоблок, затем каждый год вводился новый энергоблок. На строительстве действовал четко организованный конвейер, которого мир не знал ни ранее, ни потом. Пуск 6-го блока планировался на 1989 г., но из-за моратория, объявленного на ввод новых мощностей, блок не успели пустить. К чести директора ЗАЭС В.К. Бронникова, он не допустил растаскивания оборудования 6-го энергоблока, как на других строящихся АЭС Украины, и уже в 1993 г., когда отменили мораторий, пуск этого энергоблока состоялся – ЗАЭС стала крупнейшей АЭС в Европе. ЦНИИКА для ЗАЭС разрабатывал принципиально новую управляющую вычислительную систему (УВС) «Комплекс-Титан». Мы проводили расчеты надежности этой системы,



Совет по надежности АСУТП в Омске в Мемориальном сквере памяти борцов революции. 1984 .
На фото: 4-й слева- Ш.А. Киясбейли, 5-й слева М.А. Ястребенецкий, крайний справа Ю. Г. Заренин

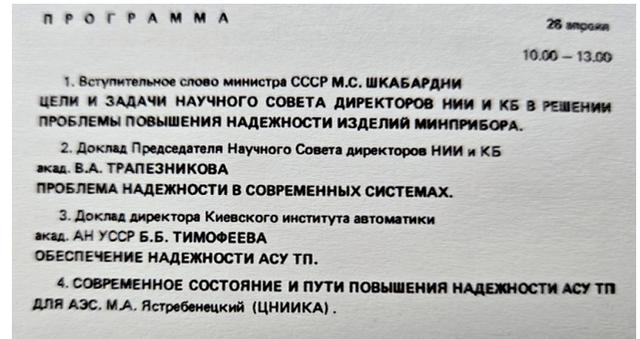
участвовали в испытаниях. На ЗАЭС я впервые побывал под оболочкой реактора до его загрузки ядерным топливом. Кроме УВС, мы занимались надежностью и иной новой аппаратуры Минприбора, впервые поставленной на АЭС, особенно универсального комплекса технических средств – УКТС. Вот тут уже были огромные проблемы. Как сказал один из наладчиков этого комплекса: «Блок на УКТС мы пустим, а уж можно ли будет его остановить, когда нужно, – не знаем». Наши рекомендации в какой-то степени позволили повысить надежность УКТС.

В 1983 г. мы разработали первый нормативный документ для АЭС – «Общие технические требования по надежности технических средств Минприбора для АЭС». Добавлю сюда, что серия из восьми Государственных общесоюзных стандартов (ГОСТ) 25804–83 «Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций», два из которых мы разработали в 1983 г. (содержащие требования к надежности и испытаниям на надежность), действовала более 30 лет.

Толчком в работах по надежности АСУТП АЭС был Научный Совет директоров НИИ и КБ Минприбора, проведенный в апреле 1984 г. Совет был посвящен повышению надежности изделий Минприбора, мой доклад был в начале заседания Совета.

Пожалуй, из всех моих выступлений этот доклад – «Современное состояние и пути повышения надежности АСУТП АЭС» был наиболее важным. Я привел показатели надежности технических средств и функций АСУТП АЭС, причины их недостаточной надежности,

рассказал о мероприятиях, уже проведенных Минприбором по повышению надежности, и о направлениях дальнейших работ.



В заседании участвовал Министр приборостроения, средств автоматизации и вычислительной техники М.С. Шкабардня, а руководил Советом директоров ИПУ знаменитый академик В.А. Трапезников, чье имя сейчас носит этот институт. Мой доклад вызвал значительный резонанс, доклад был направлен в организацию страны, существенно превышающую уровень министерства.

Выполняя служебные командировки, я объездил всю страну – от Армянской АЭС (Мецамор, Армения) до Билибинской АЭС (Чукотка). На карте крестиком отмечены места командировок.

Последующие работы мои, как и нашего коллектива, связаны с обеспечением безопасности АЭС.

Кого я учил надежности. Это короткое продолжение разделов о тех, кто меня учил надежности.



Карта моих служебных командировок в СССР

Аттестат ВАК об ученом звании профессора по кафедре технической кибернетики я получил в 1986 г. В течение многих лет – с 1984 г. по 2022 г. – я работал в Харьковском Политехническом институте на кафедре «Техническая кибернетика», а затем переименованной в «Системный анализ» и читал там курс лекций по теории надежности. Лекции этого же направления я также читал в различных учебных заведениях нашей страны, а также в Болгарии и на Кубе. Я руководил аспирантами, выполнявшими диссертации по вопросам надежности, проживающими не только в Харькове, но и в Москве, Белоруссии, Азербайджане, Казахстане, Вьетнаме. В Харьковском и Одесском политехнических институтах были изданы пособия для студентов, изучающих теорию надежности.

Тесная связь сложилась с кафедрой «АСУТП тепловых и атомных электростанций» Московского энергетического института. Совместно с доцентом этой кафедры Г.М. Ивановой мы написали учебник «Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами» (1989 г.) для студентов, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств»¹. Учебник был утвержден Государственным Комитетом по народному образованию. Через 20 лет после выхода в свет этой книги на конфе-

¹ Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами: Учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматизация технол процессов и пр-в». М.: Энергоатомиздат, 1989. 263 с.: ил.

ренции в Японии ко мне обратился коллега из Москвы: «А я Вас знаю. Мы в МИФИ учились по Вашей книге».

Не могу не вспомнить, какие теплые, человеческие отношения были между людьми в те годы. Можно сказать, что надежность техники обеспечивалась благодаря надежности людей. В Харькове, когда у членов моей семьи возникли проблемы со здоровьем, помощь с дефицитными лекарствами мне оказывали из разных городов страны: от Сибири (Ю.Н. Руденко) до Баку (Ш.А. Киясбейли).

Когда тяжелая болезнь харьковского профессора В.Ф. Шукайло привела его в клинику Московского мединститута для операции на сердце, его мать должна была приехать ухаживать за ним, но жить ей было нелегко. Шукайло обратился за помощью к Г.В. Дружинину, с которым был знаком по семинарам по надежности. Дружинин в это время был деканом факультета в МИИТ. Шукайло попросил помочь устроить мать в общежитие МИИТа. В ответ на эту просьбу, Дружинин предложил поселить ее в Москве у своей матери. В своей книге², я вспоминаю о многих и многих добрых людях, в которых глубокий профессионализм сочетались с широкой душой и человечностью.

И таких примеров сотни в моей жизни.

² Ястребенецкий М.А. Поколения Ястребенецких. Часть 2. Харьков, Aladin Print, 2021. 161 с.

Об авторе:

Михаил Анисимович Ястребенецкий, доктор технических наук, профессор. Родился в 1934 г. в г. Москва (СССР). Профессор Харьковского политехнического университета (1984-2022). Руководитель программного комитета и председатель международных научно-технических конференций «Информационные и управляющие системы АЭС: аспекты безопасности» (2003, 2005, 2007, 2010, 2013).
E-mail: ma.yastreb2013@gmail.com



Редакция рекомендует

На пути к формализму риска. Безопасность и устойчивость функционирования умных экспансивных систем



ISBN 978-5-9729-2373-1

Автор: Бочков А.В.

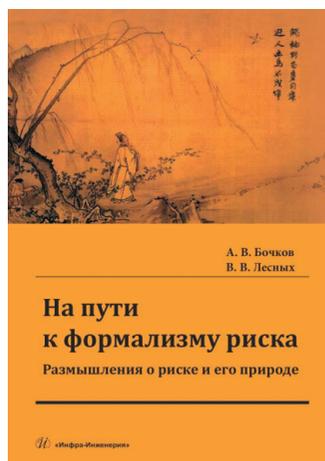
Издательство: Инфра-Инженерия

Объем 348 с.

Год: 2025

Представлена методология обеспечения безопасности и устойчивости функционирования особого класса структурно-сложных систем – умных экспансивных систем, направленная на прогнозирование и снижение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, нарушающих условия жизнедеятельности людей. Методология оперирует пятью ключевыми, неразрывно связанными между собой методами, решающими задачи, возникающие при построении подсистем, обеспечивающих безопасность и устойчивость рассматриваемого класса структурно сложных систем в условиях возникновения нештатных и чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и антропогенного характера. В отличие от существующих подходов рассматривается невероятная постановка, что оправдано для редких событий, какими являются чрезвычайные ситуации и противоправные акции. Разработан метод, обеспечивающий поддержку принятия решения в так называемой задаче группового выбора объектов критически важной инфраструктуры, требующих повышенного внимания службы безопасности и затрат ресурсов государства и собственника системы на обеспечение их защищенности, безопасности и устойчивости функционирования. Разработан и теоретически обоснован метод построения интегрального показателя безопасности, позволившего решить задачу построения оптимальных процессов дискретной обработки непрерывных данных, поступающих от системы, снизить размерность её описания с целью повышения оперативности принятия управляющих решений, обеспечивающих её устойчивое функционирование при наличии внешних негативных воздействий различной природы. Для широкого круга научных работников и специалистов в области анализа, оценки и управления рисками.

На пути к формализму риска. Размышления о риске и его природе



ISBN 978-5-9729-2146-1

Авторы: Бочков А.В., Лесных В.В.

Издательство: Инфра-Инженерия

Объем 296 с.

Год: 2024

Кажется, мы знаем о риске почти всё и в то же время ничего. Сконцентрировавшись на этимологии слова «риск», исследователи часто упускают из виду его природу, причины и характеристики. В то же время в разных ситуациях риск проявляется по-разному и может быть как характеристикой случайного события, так и характеристикой и мерой качества процесса, протекающего во времени. В последнем случае риску присущи свойства волнового процесса, что требует поиска иных мер, кроме вероятностных, для его измерения и оценки. В данной работе сделана попытка обобщить наиболее характерные различные проявления риска и предложить способы оценки риска, учитывающие эти различия. Книга может рассматриваться как приглашение к дискуссии о природе риска и о том, как может быть построен его формализм. Для широкого круга научных работников и специалистов в области анализа, оценки и управления рисками.

Надежность, риски, безопасность систем управления на железнодорожном транспорте



ISBN 978-5-9729-1992-5

Авторы: Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н., Бочков А.В.

Издательство: Инфра-Инженерия

Объем: 416 с.

Год: 2024

Центральное внимание уделено вопросам обеспечения структурной и особенно функциональной надежности. Обсуждается специфика терминологии в данной области. Представлена методологическая основа прогнозирования редких опасных событий (отказов). Рассмотрен комплекс математических моделей и методов, различных метрик для проверки качества построенных моделей. Большое внимание уделено вопросам нормирования показателей надёжности. Представлены результаты современных исследований авторов в области безопасности движения поездов, включая информационную безопасность. Для широкого круга научных работников, специалистов железнодорожной отрасли, связанных с процессами управления, а также для профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов вузов железнодорожного транспорта.

Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте



ISBN 978-5-9729-1553-8

Авторы: Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н.

Издательство: Инфра-Инженерия

Объем: 360 с.

Год: 2023

Представлен широкий спектр вопросов функциональной безопасности – от научных основ (понятий, постулатов, принципов) до методов и способов обеспечения безопасности технических средств и программного обеспечения систем управления на железнодорожном транспорте, включая прогрессивные методы обеспечения безопасности с помощью виртуальных каналов и цифровых двойников. Значительное внимание уделено методологии подтверждения соответствия требованиям функциональной безопасности. Для широкого круга научных работников, специалистов железнодорожной отрасли, связанных с процессами управления, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов вузов железнодорожного транспорта. Может представлять интерес специалистам, студентам и преподавателям других отраслей.

Надежность и безопасность программного обеспечения



ISBN 978-5-534-05142-1

Авторы: Казарин О.В., Шубинский И.Б.

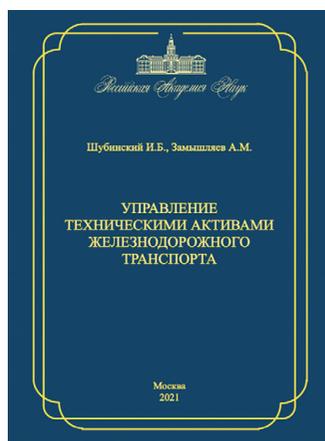
Издательство: Москва, Издательство Юрайт

Объем: 342 с.

Год: 2024

В курсе изложены теоретические и практические основы создания надежного и безопасного программного обеспечения информационных систем. Приведены правила, этапы и технологии построения надежного программного обеспечения. Рассмотрены требования к функциональной надежности и архитектуре программного обеспечения критически важных систем, методы защиты программного обеспечения от вредоносных программ, методы обеспечения безопасности программ, реализуемые на этапах испытания программных комплексов, методы и средства тестирования и защиты программ от исследования недобросовестными конкурентами и злоумышленниками. Представлены нормативные документы, регулирующие деятельность в данной сфере, а также процедуры подтверждения соответствия надежности и безопасности программного обеспечения современных информационных систем требованиям российских регуляторов.

Управление техническими активами железнодорожного транспорта



ISBN 975-5-902928-89-8

Авторы: Шубинский И.Б., Замышляев А.М.

Издательство: М.: ВИНТИ РАН

Объем 248 с.

Год: 2021

В книге изложены ключевые положения системы управления техническими активами на основе УРРАН- методологии управления ресурсами, рисками путем анализа и обеспечения требуемых уровней надежности и безопасности объектов железнодорожного транспорта. Приведены базовые понятия и показатели надежности и функциональной безопасности объектов, эталонирование этих объектов транспорта и нормирование показателей их надежности. Приведены основы управления техническими, технологическими и техногенными рисками на железнодорожном транспорте, представлены основы управления ресурсами, а также методики оценки деятельности структурных подразделений инфраструктуры и подвижного состава. Представлена архитектура единой корпоративной платформы информационной системы УРРАН (ЕКП УРРАН) и ее подсистем для комплексов объектов транспорта. Показаны перспективы развития ЕКП УРРАН, особенно в части применения искусственного интеллекта для прогнозирования опасных событий в работе инфраструктуры. Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся практической работой по техническому содержанию объектов железнодорожного транспорта. Она предназначена студентам, аспирантам железнодорожных вузов и может быть также полезна специалистам, студентам и преподавателям других отраслей.

Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза



ISBN 978-5-7572-0399-7

Автор: Шубинский И.Б.

Издательство: Ульяновск: Печатный двор; М.: Надежность

Объем: 546 с.

Год: 2016

В книге приведены концептуальные положения обеспечения структурной и функциональной надежности информационных систем на всех стадиях их жизненного цикла. Различные виды структурного резервирования рассмотрены с учетом ограничений в обнаружении отказов. При этих условиях установлены предельные возможности структурного резервирования в предположении бесконечного количества резервных устройств. Представлены теоретические и практические положения адаптивной отказоустойчивости (активной защиты) информационных систем, в том числе методы и дисциплины активной защиты, способы ее практической реализации. Предложен метод синтеза активной защиты. Оценена эффективность активной защиты по отношению к традиционным методам структурного резервирования. Для широкого круга научных работников и специалистов в области информационной техники.





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, межстрочный 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, межстрочный 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, межстрочный 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, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «*». Точка в конце не ставится.

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

Оформление: Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

Пример (на рус. яз.):

Резюме. Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

Оформление: Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

Пример (на рус. яз.):

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, техническая эффективность.

7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

Оформление:

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например:

где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь 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.

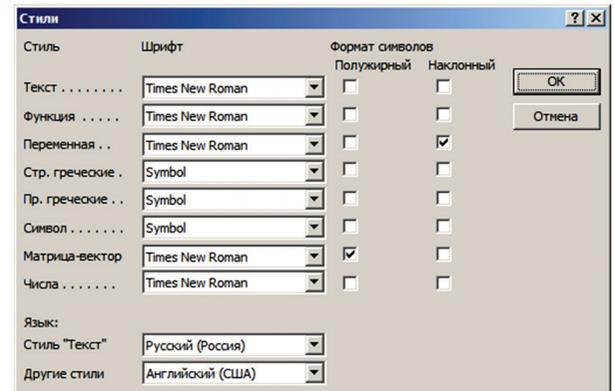
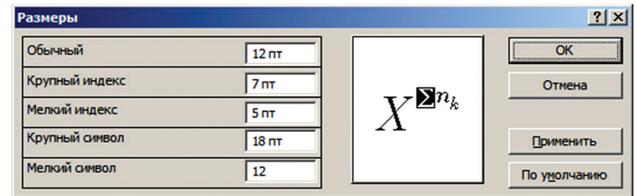
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

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-

рованием формул и их версткой настоятельно рекомендуется использовать редакторы Microsoft Equation 3.0 или MathType 6.x. Для обеспечения корректного ввода формул (размер символов, их наклон и т.д.) рекомендуемые настройки редактора приведены на рисунках ниже.



При наборе формул в редакторе формул, если требуются скобки, то следует использовать скобки из формульного редактора, а не набирать их на клавиатуре (для корректной высоты скобок в зависимости от содержимого формулы), например (Equation 3.0):

$$Z = \frac{a \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right)}{n + m}. \quad (2)$$

Сноски в тексте нумеруются арабскими цифрами, размещаются постранично. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники в сети Интернет, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах и журналах, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования), комментарии автора.

Отсылка на библиографический источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках, а источники приводятся в библиографическом списке в порядке их упоминания в тексте (затекстовые ссылки). Страница указывается внутри скобок, через запятую и пробел после номера источника: [6, с. 8]

8) Благодарности

В этом разделе указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей, но не

являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

9) Библиографический список

В библиографический список включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), упоминающиеся в тексте статьи. Нежелательно включать в библиографический список авторефераты, диссертации, учебники, учебные пособия, ГОСТы, информацию с сайтов, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах, на сайтах и в блогах. Если необходимо сослаться на такую информацию, следует поместить информацию об источнике в сноску.

При описании источника следует указывать его DOI, если удастся его найти (для зарубежных источников 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.

**МЫ —
ЛЮДИ
ДЕЛА**

