

# НАДЕЖНОСТЬ

ISSN 1729-2646  
e-ISSN 2500-3909

ТОМ **24**, №4

2024

НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

## В НОМЕРЕ

- О ФУНКЦИИ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ  $\langle GI_{ksp} | GI \rangle$ . ЧАСТЬ II. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
- ОБ АНАЛИЗЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ АВАРИЙ И ИНЦИДЕНТОВ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ
- МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА ДАННЫХ
- ОЦЕНКА, СРАВНЕНИЕ И РАНЖИРОВАНИЕ ОПЕРАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
- ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУКРАТНОГО И МНОГОКРАТНОГО НАГРУЖЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ТРУБНОЙ СТАЛИ
- КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АСУ ТП ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
- О НЕКОТОРЫХ СЛУЧАЯХ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ УЩЕРБА ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
- К ВОПРОСУ О ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

# НИИАС

Информатизация, автоматизация  
и связь на железнодорожном транспорте



НИИАС

[www.nias.ru](http://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

## ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ

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

## УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

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

## СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

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

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

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

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

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

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ АКТИВАМИ

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

## ОБРАБОТКА БОЛЬШИХ ДАННЫХ. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

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

## МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

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

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

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

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

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

## ТЕРМИНОЛОГИЯ НАДЕЖНОСТИ, ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ, РИСКОВ И ЖИВУЧЕСТИ

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Главный редактор:

**Шубинский Игорь Борисович** – доктор технических наук, профессор, эксперт Научного совета при Совете Безопасности РФ, главный эксперт, АО «НИИАС» (Москва, РФ)

### Заместители главного редактора:

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

**Шебе Хендрик** – доктор естественных наук, главный эксперт по надежности, эксплуатационной готовности, ремонтнопригодности 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, начальник отдела АО «НИИАС» (Москва, РФ)

### Председатель редакционного совета:

**Розенберг Игорь Наумович** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой «Геодезия, геоинформатика навигация», проректор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (Москва, РФ)

### 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, РФ)

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

**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, РФ)

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

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

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

**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, РФ)

**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, РФ)

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

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

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

**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, РФ)

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

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

## УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «НИИАС», ОПЖТ,  
Шубинский И.Б.

*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 02.12.2024

Объем 92, Тираж 500 экз, Заказ № 19620

Формат 60x90/8, Бумага глянцев

Журнал издается ежеквартально с 2001 года,  
стоимость одного экземпляра 1045 руб.,  
годовой подписки 4180 руб.,  
телефон редакции 8 (495) 967-77-05,  
e-mail: dependability@bk.ru

Статьи рецензируются.

Статьи опубликованы в авторской редакции.

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

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

## Рубрики журнала

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

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

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### Системный анализ в задачах надёжности и безопасности

**Рыков В.В., Иванова Н.М.** О функции надёжности системы  $\langle G_{k \leq n} | G | \rangle$ . Часть II. Численное исследование и анализ чувствительности..... 3

**Бочков А.В., Киркин М.А.** Об анализе временных рядов аварий и инцидентов на опасных производственных объектах ..... 12

### Структурная надёжность.

#### Теория и практика

**Лейзгольд К.А., Бочкарев С.В.** Методика определения необходимого количества запасных частей в условиях ограниченного объема данных ..... 20

**Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А.** Оценка, сравнение и ранжирование оперативных показателей надёжности воздушных ЛЭП электроэнергетических систем ..... 29

**Маянц Ю.А., Ширяпов Д.И., Носова Е.С.** Исследование двукратного и многократного нагружения стержневых образцов трубной стали ..... 38

### Вопросы автоматизации и управления процессами на транспорте

**Попов П.А., Розенберг Е.Н., Сабанов А.Г., Шубинский И.Б.** Комплексная безопасность АСУ ТП объектов критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта..... 48

**Лобач Д.И.** О некоторых случаях количественной оценки ущерба технической системе ..... 58

**Гамера Ю.В., Ганага С.В., Петрова Ю.Ю.** К вопросу о взрывобезопасности объектов транспорта многокомпонентных смесей..... 65

Содержание выпусков журнала «Надёжность» за 2024 год ..... 70

Гнеденко – Форум ..... 71

# О функции надежности системы $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ . Часть II. Численное исследование и анализ чувствительности

## On the dependability function of a $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ system. Part II. Numerical study and sensitivity analysis

Рыков В.В.<sup>1</sup>, Иванова Н.М.<sup>2\*</sup>

Rykov V.V., Ivanova N.M.

<sup>1</sup> Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

<sup>2</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

<sup>1</sup> National University of Oil and Gas (Gubkin University)

<sup>2</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences

\*nm\_ivanova@bk.ru



Рыков В.В.



Иванова Н.М.

**Резюме.** На основе теоретических результатов, представленных в первой части статьи, в данной части исследуются основные характеристики надежности системы  $k$ -из- $n$  с произвольными распределениями времени безотказной работы и ремонта ее элементов. На основе преобразования меток, предложенного в первой части статьи, методом имитационного моделирования вычисляются и исследуются различные вероятностно-временные характеристики модели и исследуется их чувствительность к исходным распределениям и их параметрам.

**Abstract.** Based on the theoretical findings presented in the first part of the paper, this part investigates the main characteristics of the dependability of a  $k$ -out-of- $n$  system with arbitrary distributions of failure-free time and time to component repair. Using the marks transformations proposed in Part I of the paper and simulation, various probabilistic and temporal characteristics of the model are calculated and studied, while their sensitivity to the initial distributions and their parameters is analyzed.

**Ключевые слова:** маркированный марковский процесс, система  $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ , произвольные распределения времени безотказной работы и восстановления, анализ чувствительности.

**Keywords:** marked Markov processes,  $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$  system, arbitrary distributions of failure-free time and time to repair, sensitivity analysis.

**Для цитирования:** Рыков В.В., Иванова Н.М. О функции надежности системы  $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ . Часть II. Численное исследование и анализ чувствительности // Надежность. 2024. №4. С. 3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-3-11>

**For citation:** Rykov V.V., Ivanova N.M. On the dependability function of a  $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$  system. Part II. Numerical study and sensitivity analysis. Dependability 2024;4:3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-3-11>

**Поступила:** 07.05.2024 / **После доработки:** 03.09.2024 / **К печати:** 18.11.2024

**Received on:** 07.05.2024 / **Revised on:** 03.09.2024 / **For printing:** 18.11.2024

## Введение

Вторая часть статьи посвящена численному исследованию характеристик надежности восстанавливаемой системы  $k$ -из- $n$  с произвольными распределениями времени безотказной работы (в.б.р.) и ремонта ее элементов и произвольным числом ремонтирующихся устройств, которая обозначается как  $\langle GI_{k \leq n} | GI | l \rangle$ . Напомним, что  $A_i$  и  $B_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) – в.б.р. и ремонта элементов системы, которые предполагаются взаимно независимыми одинаково распределенными (н.о.р.) случайными величинами (с.в.) с соответствующими функциями распределения  $A(t)=P\{A_i \leq t\}$  и  $B(t)=P\{B_i \leq t\}$ .

На основе теоретических результатов, содержащихся в первой части статьи [1], предложен алгоритм вычисления основных вероятностно-временных характеристик надежности этой системы. Реализация алгоритма выполнена на языке программирования Python<sup>1</sup>, в том числе с использованием библиотеки Seaborn<sup>2</sup> для генерации псевдослучайных величин с заданным распределением.

Для проверки результатов, полученных с помощью разработанного алгоритма, проводится сравнительный анализ с известными численными результатами на примере системы  $\langle M_{3 \leq 6} | GI | 1 \rangle$  [2]. Анализ показал высокую точность характеристик надежности системы, вычисленных с помощью реализации алгоритма. Проведено численное исследование системы  $\langle GI_{5 < 10} | GI | l \rangle$  для  $l = 1$  и  $l = 3$ . Представлен анализ чувствительности характеристик надежности этой системы к виду исходных распределений и коэффициентам вариации в.б.р. и ремонта компонентов.

## 1. Алгоритм вычисления функции надежности

Для описания алгоритма будем пользоваться введенными ранее в части I [1] статьи операторами, применяя их теперь к реализациям с.в.: оператором сдвига  $Sh[v_j]$  массива  $\mathbf{v}_j = (v_j^1, \dots, v_j^{n-j})$  и оператором пополнения  $Ad[v_j, v]$  массива  $\mathbf{v}_j$  новым элементом  $v$ , которые, согласно результатам части I статьи, действуют следующим образом:

$$Sh[\mathbf{v}_j, v] \equiv \{\mathbf{v}_{sh} : v_{sh}^i = v_j^i - v, (i = \overline{1, n-j-1}), v \leq v_j^i\}$$

$$Ad[\mathbf{v}_j, v] \equiv \{\mathbf{v}_{ad}(v) : v_{ad}^{(i)}(v) = v_j^i \text{ при } i < r,$$

$$v_{ad}^{i+1}(v) = v, \text{ при } i = r,$$

$$v_{ad}^{i+2}(v) = v_j^{i+1} \text{ при } i > r (i = \overline{1, j-1})\},$$

где  $r = \max\{i : v_j^i \leq v\}$ . Напомним, что при применении этих операторов к массивам  $x_j$  и  $y_j$  они имеют размерности  $n-j$  и  $j \wedge l$  соответственно.

<sup>1</sup> <https://www.python.org/>

<sup>2</sup> <https://seaborn.pydata.org/index.html>

## Алгоритм

**Подготовка.** Ввести исходные данные: целые  $n, k, M$  – число реализаций модели,  $l$  – количество ремонтирующихся устройств. Задать распределения  $A(\cdot), B(\cdot)$  случайных величин  $A_i, B_i$ , соответствующие средние  $\mu_A, \mu_B$  и коэффициенты вариации  $v_A, v_B$ <sup>3</sup>.

Подготовить счетчики:  $v_j = (v_1, \dots, v_k)$  – число посещений состояний  $j = 1, k$ ;  $m$  – счетчик числа реализаций; и массивы:  $R = [0] * M$  – время до отказа системы,  $t_1, \dots, t_k$  – длительности пребывания системы в состояниях  $j = 1, k$ .

**Начало.** Положить  $j=0, m=1$ . Сгенерировать  $n$  реализаций с.в.  $A \in A(\cdot)$  и вычислить начальное состояние системы в виде вариационного ряда из этой выборки

$$\mathbf{x}_0 = \{x_0^i (i = \overline{1, n}) : x_0^1 \leq x_0^2 \leq \dots \leq x_0^n\}, \mathbf{y}_0 = \{y_0^1 = \infty\}.$$

**Шаг 1.** Если  $m < M$ , то переход на Шаг 2, в противном случае переход на Шаг 6.

**Шаг 2.** Считать  $t_j := t_j + x_0^1, v_j := v_j + 1, R_m := R_m + x_0^1, j := j + 1$ .

Вычислить  $\mathbf{x}_j = Sh[\mathbf{x}_{j-1}, x_0^1], \mathbf{y}_j = Ad[\mathbf{y}_{j-1}, B]$ .

Переход на Шаг 3.

**Шаг 3.** Пока  $0 < j < k$ , повторять:

если  $x_j^1 \leq y_j^1$ :

положить  $t_j := t_j + x_j^1, v_j := v_j + 1, R_m := R_m + x_j^1, j := j + 1$ ;

вычислить  $\mathbf{x}_j = Sh[\mathbf{x}_{j-1}, x_j^1], \mathbf{y}_j = Sh[\mathbf{y}_{j-1}, x_j^1]$ ;

если  $j \leq l$ ,

то  $\mathbf{y}_j = Ad[B]$ ;

если  $x_j^{(l)} > y_j^{(l)}$ :

положить  $t_j := t_j + y_j^1, v_j := v_j + 1, R_m := R_m + y_j^1$ ,

$j := j - 1$ ;

вычислить

если  $j=0$ :

$\mathbf{x}_j = Ad[Sh[\mathbf{x}_{j-1}, y_{j-1}^1], A], \mathbf{y}_j = \{y_j^1 = \infty\}$ . Переход на Шаг 2;

иначе  $j \neq 0$ :

$\mathbf{x}_j = Ad[Sh[\mathbf{x}_{j-1}, y_{j-1}^1], A]$ ;

если  $j < l$ ,

$\mathbf{y}_j = Sh[\mathbf{y}_{j-1}, y_{j-1}^1]$ ;

иначе  $j \geq l$  или  $l=1$ ,

$\mathbf{y}_j = Ad[Sh[\mathbf{y}_{j-1}, y_{j-1}^1], B]$ .

**Шаг 4.** Если  $j=k$ , то положить  $j=0$  и перейти на Шаг 5.

**Шаг 5.** Сбор статистики:

• заполнение массива  $v_j$ ,

• заполнение массива  $R$  значениями  $R_m$ ,

• заполнение массивов  $t_1, \dots, t_k$ .

Положить  $m := m + 1$ . Перейти на Начало.

**Шаг 6.** Обработка Статистики:

• вычисление распределения числа  $v_j$  посещений состояний  $j$ ,

$$\hat{v} = \frac{v_j}{\sum_{j \leq k} v_j},$$

<sup>3</sup> Обращаем внимание читателя, что здесь  $v_A$  и  $v_B$  обозначают коэффициенты вариации, а не метку

- вычисление эмпирической функции надежности  $\hat{R}(t)$ ,

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{1}{M} R_m, \quad R_m \leq t < R_{m+1},$$

- среднего времени жизни системы,

$$\mu_R = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M R_m,$$

- вывод результатов.

СТОП

## 2. Численные примеры и анализ чувствительности

В этом разделе будут рассмотрены численные примеры, а также проведено сравнение результатов оценки характеристик надежности, полученных с помощью алгоритма, с численными результатами, вычисленными из явных аналитических выражений.

### 2.1. Сравнение с аналитическими результатами для модели $\langle M_{k<n} | GI | 1 \rangle$

Для начала сравним результаты алгоритма с результатами, полученными при расчете по известным аналитическим выражениям. Для оценки точности рассмотрим абсолютную погрешность  $\Delta$ ,

$$\Delta = |R_{in}(t) - \hat{R}(t)|,$$

где  $R_{in}(t)$  – значения функции надежности, вычисленные по аналитической формуле, а  $\hat{R}(t)$  – оценка значений функции надежности, полученная с помощью алгоритма.

Рассмотрим систему 3-из-6 с одним ремонтным устройством. Для моделирования времени до отказа компонентов используется показательное распределение, а для времени их ремонта – произвольное. В обобщенной символике Кендалла такая система будет обозначаться

как  $\langle M_{3<6} | GI | 1 \rangle$ . Аналитические выражения функции надежности и среднего времени жизни такой системы были получены ранее с помощью метода введения дополнительных переменных и решения дифференциальных уравнений Колмогорова в частных производных методом характеристик [2]. В случае когда время ремонта имеет показательное распределение, характеристики системы могут быть получены с помощью простого процесса рождения и гибели. В качестве распределений времени ремонта выбраны распределения Гамма ( $\Gamma$ ) и Гнеденко-Вейбулла ( $GW$ ). Параметры и характеристики этих распределений представлены в табл. 1.

Далее для определения среднего и коэффициента вариации в.б.р., ремонта элементов и в.б.р. всей системы будут использоваться нижние индексы, соответствующие этим с.в., а именно  $A$ ,  $B$  и  $R$ .

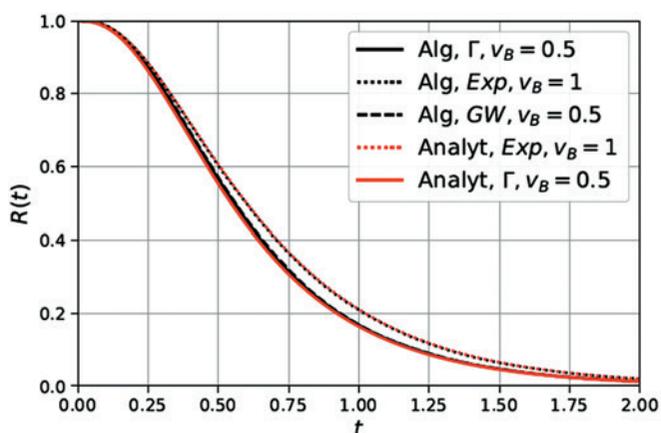
В случае когда  $v_B=1$ , распределение времени ремонта элементов системы становится экспоненциальным со средним  $\mu_B$ , что приводит к марковской модели  $\langle M_{3<6} | M | 1 \rangle$ . Этот пример будет рассматриваться в качестве проверки точности алгоритма. Для сравнения результатов алгоритма в случае непоказательного распределения времени ремонта рассмотрена система  $\langle M_{3<6} | \Gamma | 1 \rangle$ , для которой аналитические и численные результаты также представлены в работе [2].

Положим для примера  $\mu_A=\mu_B=1$ ,  $v_B=0,5$ , 1. Графические результаты оценки функции надежности системы  $\langle M_{3<6} | GI | 1 \rangle$  представлены на рис. 1, а) в масштабе  $t$  и на рис. 1, б) в масштабе среднего времени жизни системы. Представленные кривые получены как численно, так и с помощью разработанного алгоритма.

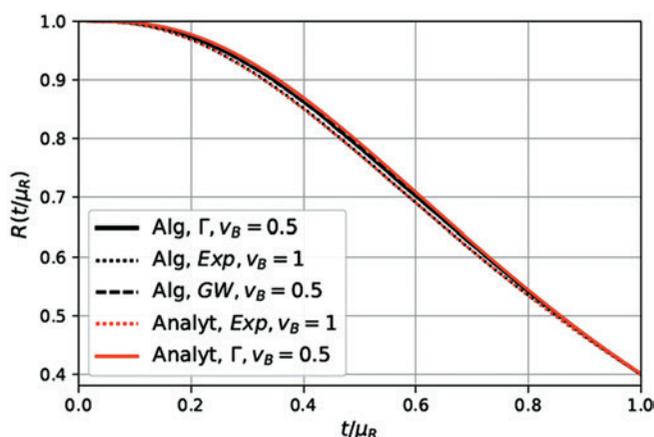
Черные кривые представляют собой функцию надежности, оценка которой получена с помощью алгоритма, красный цвет кривых соответствует численному решению при  $B \sim \Gamma$ . Оценка функции надежности с помощью предложенного алгоритма демонстрирует высокую точность по сравнению с аналитическими результатами.

Табл. 1. Распределения времени ремонта и их характеристики

| Характеристика   | $GW(\alpha, \beta)$   | $\Gamma(\alpha, \beta)$   |
|--|---|---|
| $\alpha$ – параметр формы, $\beta$ – параметр масштаба |   |   |
| Функция распределения                                  | $F(t) = 1 - e^{-(t/\beta)^\alpha}$  | $F(t) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha, t\beta)}{\alpha}$                            |
| Плотность распределения                                | $f(t) = \frac{\alpha e^{-(t/\beta)^\alpha} (t/\beta)^{\alpha-1}}{\beta}, t > 0$ | $f(t) = \frac{\beta^\alpha e^{-t/\beta} t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, t > 0$ |
| Математическое ожидание                                | $\mu = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$                           | $\mu = \frac{\alpha}{\beta}$  |
| Дисперсия  | $\sigma^2 = \beta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \mu^2$            | $\sigma^2 = \frac{\alpha}{\beta^2}$   |
| Коэффициент вариации                                   | $v = \frac{\sigma}{\mu}$  | $v = \frac{\sqrt{\alpha}}{\alpha}$  |
| Параметры распределений                                | $\alpha, \beta = \frac{\mu}{\Gamma(1 + 1/\alpha)}$                              | $\alpha = v^{-2}, \beta = \mu v^2$  |



а) В масштабе  $t$



б) В масштабе  $\mu_R$

Рис. 1. Функция надежности системы  $\langle M_{3<6} | GI | 1 \rangle$

Кроме того, из графика видно, что кривая функции надежности при  $B \sim GW$  практически идентична кривой при  $B \sim \Gamma$ , что говорит о слабой зависимости функции надежности системы от вида ф.р. времени ремонта ее элементов.

На рис. 1, а) кривые функции надежности марковской модели (красные и черные штриховые кривые), то есть при  $v_B = 1$ , расположены выше кривых с меньшим коэффициентом вариации времени ремонта. Однако при больших значениях времени  $t$  все кривые сливаются в одну.

На рис. 1, б) все кривые расположены очень близко друг к другу. К моменту  $t/\mu_R = 1$  значение функции надежности достигает  $R(t) \approx e^{-1}$ , что демонстрирует нечувствительность функции надежности системы  $\langle M_{3<6} | GI | 1 \rangle$  к виду распределения и коэффициенту вариации времени ремонта  $v_B$  при фиксированном среднем  $\mu_B$  в масштабе среднего времени жизни системы  $\mu_R$ .

В табл. 2 представлены значения среднего времени жизни для данной системы. Оценка среднего времени  $\mu_R$ , полученная с помощью алгоритма, достаточно близка к аналитическим результатам. Так же, как и график функции надежности, она отражает высокую точность предложенного алгоритма.

Рассмотрим погрешность  $\Delta$  результатов, полученных с помощью алгоритма, по сравнению с численными. На

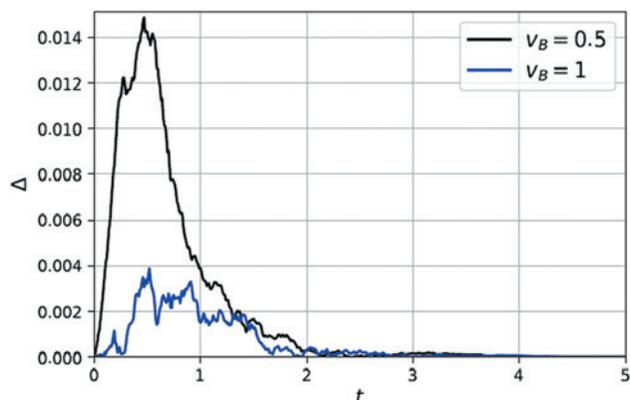


Рис. 2.  $\Delta$  оценки функции надежности системы  $\langle M_{3<6} | GI | 1 \rangle$

Табл. 2. Среднее время жизни  $\mu_R$  системы  $\langle M_{3<6} | GI | 1 \rangle$

| Параметры           | $\mu_R$      |              |
|---------------------|--------------|--------------|
|                     | Аналитически | По алгоритму |
| $\Gamma, v_B = 0,5$ | 0,65221      | 0,65276      |
| $\Gamma, v_B = 0,5$ | —            | 0,65613      |
| Exp, $v_B = 1$      | 0,70833      | 0,70872      |

рис. 2 представлена абсолютная погрешность оценки функции надежности системы  $\langle M_{3<6} | GI | 1 \rangle$  на интервале  $t \in [0, 5]$  при  $v_B = 0,5; 1$ . Согласно графику, максимальная погрешность для  $v_B = 0,5$  составляет  $\max(\Delta) \approx 0,015$ , а при  $v_B = 1$   $\max(\Delta) \approx 0,004$ . При этом средние погрешности равны соответственно  $E[\Delta] = 0,0021$  для  $v_B = 0,5$  и  $E[\Delta] = 0,00061$  для  $v_B = 1$ . Представленные оценки подтверждают высокую точность полученных с помощью алгоритма результатов.

## 2.2. Численное исследование системы $\langle GI_{5<10} | GI | l \rangle$

Для исследования влияния числа ремонтных устройств на характеристики системы при произвольном распределении в.б.р. ее элементов рассмотрим систему 5-из-10. Пусть среднее в.б.р.  $\mu_A = 10$ , среднее время ремонта  $\mu_B = 1$ , число ремонтных устройств меняется,  $l = 1, 3$ . В.б.р. компонентов имеет распределение Гамма с коэффициентом вариации  $v_A = 0,1, 0,5, 1, 3$ ; время ремонта имеет распределение Гамма или Гнеденко-Вейбулла с коэффициентом вариации  $v_B = 0,1, 0,5, 1, 5$ . Исследуем чувствительность характеристик надежности такой системы к виду распределения времени ремонта, а также к значениям коэффициента вариации в.б.р.  $v_A$  и ремонта компонентов  $v_B$ .

### 2.2.1. Число ремонтных устройств $l = 1$

Сперва рассмотрим систему 5-из-10 с одним ремонтным устройством. Результаты оценки функции



Табл. 4. Коэффициент вариации  $v_R$  времени жизни системы  $\langle \Gamma_{5<10}|GI|1 \rangle$

| $v_A =$   | 0,1      |       | 0,5      |       | 1        |       | 3        |       |
|-----------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| $B \sim$  | $\Gamma$ | $GW$  | $\Gamma$ | $GW$  | $\Gamma$ | $GW$  | $\Gamma$ | $GW$  |
| $v_B=0,1$ | 0,222    | 0,258 | 0,924    | 0,900 | 0,951    | 0,960 | 8,648    | 8,178 |
| $v_B=0,5$ | 0,458    | 0,529 | 0,842    | 0,853 | 0,932    | 0,931 | 8,509    | 8,106 |
| $v_B=1$   | 0,443    | 0,436 | 0,724    | 0,732 | 0,899    | 0,897 | 7,598    | 7,750 |
| $v_B=5$   | 0,725    | 0,731 | 0,677    | 0,703 | 0,821    | 0,845 | 3,024    | 4,527 |

Табл. 5. Квантили  $q_\gamma$  надежности системы  $\langle \Gamma_{5<10}|GI|1 \rangle$

| Распределение |             | $B \sim \Gamma$   |                   |                   |                   | $B \sim GW$       |                   |                   |                   |
|---------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $v_B =$       |             | 0,1               | 0,5               | 1                 | 5                 | 0,1               | 0,5               | 1                 | 5                 |
| $v_A=0,1$     | $q_{0,9}$   | 9,458             | 9,476             | 9,514             | 9,881             | 9,457             | 9,474             | 9,524             | 9,746             |
|               | $q_{0,99}$  | 9,015             | 9,037             | 9,066             | 9,334             | 9,019             | 9,044             | 9,068             | 9,218             |
|               | $q_{0,999}$ | 8,705             | 8,733             | 8,777             | 8,962             | 8,714             | 8,746             | 8,764             | 8,879             |
| $v_A=0,5$     | $q_{0,9}$   | 11,416            | 10,344            | 9,162             | 9,642             | 11,428            | 10,416            | 9,164             | 9,404             |
|               | $q_{0,99}$  | 6,818             | 6,467             | 6,375             | 6,494             | 6,804             | 6,488             | 6,214             | 6,471             |
|               | $q_{0,999}$ | 4,942             | 4,871             | 5,041             | 5,345             | 5,132             | 4,951             | 5,049             | 5,103             |
| $v_A=1$       | $q_{0,9}$   | 7,366             | 6,631             | 5,563             | 6,549             | 7,607             | 6,490             | 5,591             | 6,340             |
|               | $q_{0,99}$  | 2,133             | 2,084             | 2,123             | 2,909             | 2,198             | 2,077             | 2,021             | 2,627             |
|               | $q_{0,999}$ | 0,941             | 1,013             | 1,101             | 1,478             | 0,967             | 1,064             | 1,064             | 1,482             |
| $v_A=3$       | $q_{0,9}$   | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ |
|               | $q_{0,99}$  | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ |
|               | $q_{0,999}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $3 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ |

Табл. 6. Квантили  $q_\gamma$  надежности системы  $\langle \Gamma_{5<10}|GI|1 \rangle$  в масштабе  $\mu_R$

| Распределение |             | $B \sim \Gamma$   |                    |                   |                   | $B \sim GW$       |                   |                   |                   |
|---------------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $v_B =$       |             | 0,1               | 0,5                | 1                 | 5                 | 0,1               | 0,5               | 1                 | 5                 |
| $v_A=0,1$     | $q_{0,9}$   | 0,939             | 0,924              | 0,876             | 0,467             | 0,939             | 0,919             | 0,875             | 0,554             |
|               | $q_{0,99}$  | 0,896             | 0,881              | 0,834             | 0,441             | 0,896             | 0,878             | 0,833             | 0,524             |
|               | $q_{0,999}$ | 0,865             | 0,851              | 0,808             | 0,424             | 0,865             | 0,849             | 0,806             | 0,504             |
| $v_A=0,5$     | $q_{0,9}$   | 0,186             | 0,258              | 0,359             | 0,383             | 0,188             | 0,258             | 0,356             | 0,381             |
|               | $q_{0,99}$  | 0,111             | 0,161              | 0,250             | 0,259             | 0,112             | 0,161             | 0,241             | 0,262             |
|               | $q_{0,999}$ | 0,081             | 0,122              | 0,198             | 0,212             | 0,085             | 0,123             | 0,196             | 0,206             |
| $v_A=1$       | $q_{0,9}$   | 0,152             | 0,166              | 0,199             | 0,257             | 0,153             | 0,164             | 0,198             | 0,242             |
|               | $q_{0,99}$  | 0,044             | 0,052              | 0,076             | 0,114             | 0,044             | 0,053             | 0,071             | 0,101             |
|               | $q_{0,999}$ | 0,019             | 0,025              | 0,039             | 0,058             | 0,019             | 0,027             | 0,037             | 0,057             |
| $v_A=3$       | $q_{0,9}$   | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$  | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ |
|               | $q_{0,99}$  | $8 \cdot 10^{-7}$ | $10 \cdot 10^{-7}$ | $8 \cdot 10^{-7}$ | $6 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $9 \cdot 10^{-7}$ | $4 \cdot 10^{-7}$ |
|               | $q_{0,999}$ | $7 \cdot 10^{-9}$ | $9 \cdot 10^{-9}$  | $8 \cdot 10^{-9}$ | $6 \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-9}$ |

Используя функцию надежности системы, вычислим среднее время ее жизни, а также коэффициент вариации (табл. 3 и 4). Данные таблиц показывают, что обе характеристики чувствительны к значению коэффициента вариации в.б.р. компонентов  $v_A$ . При увеличении  $v_A$  обе характеристики растут при  $v_B \leq 1$ . При  $v_B = 5$  среднее время жизни системы сначала растет с увеличением  $v_A$ , а затем уменьшается. При  $v_A = 3$  среднее  $\mu_R$  более чем в два раза ниже по сравнению с другими значениями  $v_A$ . Кроме того, наблюдается слабая чувствительность среднего времени жизни системы к виду распределения времени ремонта при фиксированных  $v_B$  и в случае  $v_B \leq 1$ .

Коэффициент вариации  $v_R$  времени жизни системы также чувствителен к коэффициенту вариации в.б.р.

компонентов  $v_A$ , но кроме того чувствителен и к коэффициенту вариации  $v_B$  (см. табл. 4). При увеличении  $v_A$  также увеличивается и коэффициент вариации  $v_R$  при  $v_B \leq 1$ . Однако при фиксированных значениях  $v_A$  увеличение  $v_B$  приводит к снижению значений коэффициента вариации времени жизни системы при  $v_A > 0,1$ . Напротив, при относительно малом значении  $v_A = 0,1$  увеличение коэффициента вариации времени ремонта приводит к росту  $v_R$ . При этом также наблюдается слабая чувствительность коэффициента вариации времени жизни системы к виду распределения времени ремонта при фиксированных  $v_B$ .

Далее рассмотрим квантили надежности  $q_\gamma = R^{-1}(\gamma)$  (табл. 5). Эта мера показывает, как долго система будет

функционировать с фиксированной вероятностью. Рассмотрим значения квантилей при  $\gamma=0,9, 0,99, 0,999$ .

Очевидно, коэффициент вариации в.б.р. компонентов  $v_A$  существенно влияет на значения квантилей надежности системы. Кроме того, наблюдается и влияние коэффициента вариации времени ремонта  $v_B$ . Наибольшее значение квантиля  $q_{0,9}$  достигается при значениях  $v_A=0,5$  и  $v_B=0,1$ ,  $\max(q_{0,9}) \approx 11,4$ . Наибольшие значения квантилей  $q_{0,99}$  и  $q_{0,999}$  достигаются при наименьшем коэффициенте вариации в.б.р.  $v_A=0,1$  и наибольшем  $v_B=5$ ,  $\max(q_{0,99}) \approx \max(q_{0,999}) \approx 9$ . Более того, их значения достаточно близки друг к другу при изменении распределения и коэффициента вариации времени ремонта  $v_B$ . Наибольшее значение  $v_A=3$  приводит к тому, что система становится ненадежной. Для всех значений  $q_\gamma$  вид распределения времени ремонта не оказывает влияния на квантили надежности при фиксированных  $v_B$ .

Также рассмотрим квантили надежности, вычисленные в масштабе среднего времени жизни системы (табл. 6). Наибольшее значение среди всех рассматриваемых квантилей достигается при наименьшем значении коэффициента вариации в.б.р. компонентов  $v_A=0,1$ . При этом с увеличением значения  $v_B$  квантили надежности уменьшаются при  $v_A=0,1$ . В других случаях  $v_A \neq 0,1$ , напротив, с увеличением  $v_B$  увеличиваются и значения  $q_\gamma$ .

### 2.2.2. Число ремонтных устройств $l=3$

Рассмотрим теперь аналогичную систему, но с большим числом ремонтных устройств. Пусть  $l=3$ , остальные параметры остаются прежними (см. подпункт 2.2.1). Исследуем чувствительность характеристик надежности к виду распределения и коэффициенту вариации в.б.р. и ремонта. Кроме того, сравним результаты этого подпункта с предыдущим, чтобы понять, как количество ремонтных устройств влияет на характеристики надежности системы и как в этом случае эти характеристики зависят от вида распределения и коэффициента вариации в.б.р. и ремонта компонентов.

На рис. 4 продемонстрирована функция надежности системы  $\langle \Gamma_{5<10} | GI | 3 \rangle$ : рис. 4, а) представлен в масштабе  $t$ , рис. 4, б) – в масштабе среднего времени жизни  $\mu_R$  системы.

Рассмотрим рис. 4, а). Очевидно, что с большим числом ремонтных устройств система останется работоспособной в течение большого времени, поэтому в этом случае кривые  $R(t)$  медленнее стремятся к нулю с ростом  $t$ . При этом зависимость функции надежности от коэффициента вариации в.б.р. компонентов сохраняется. При значениях  $v_A=3$  (оранжевые и серые кривые) и  $v_A=0,1$  (черные и синие кривые) система ненадежна и  $R(t) \rightarrow 0$  при малом  $t$  в случае  $v_B \leq 1$ . При  $v_B=5$  кривые функции надежности расположены выше относительно  $v_B \leq 1$ . В случае  $v_A=1, 0,5$  и всех заданных значениях  $v_B$  кривые функции  $R(t)$  расположены относительно близко друг к другу. При этом выявить определенное влияние этих значений на надежность системы графически достаточно сложно, поскольку различие между штрихами и цветами достаточно размыто. Интересно, что функция надежности при  $v_A=0,1$  и  $v_B=5$  (черная штрихпунктирная кривая) лежит достаточно близко к группе кривых при  $v_A=1, 0,5$ . Сделать выводы о чувствительности функции надежности к виду распределения времени ремонта не представляется возможным. Однако общее влияние исходных параметров системы на ее надежность очевидна.

Рассмотрим рис. 4, б), где тот же результат представлен в масштабе среднего времени жизни  $\mu_R$  системы. Поведение кривых функции надежности системы при  $l=3$  в масштабе  $\mu_R$  отличается от аналогичного примера при  $l=1$ . При  $v_A=1, 0,5$  кривые надежности сходятся в окрестности значения  $R(t) \approx e^{-1}$ . Однако в остальных случаях, при  $v_A=0,1, 3$ , кривые быстрее стремятся к нулю с ростом  $t/\mu_R$  так, что к моменту  $t/\mu_R=1$  вероятность работоспособности становится очень маленькой,  $R(t) < 0,2$ . Очевидно, что такое поведение кривых будет иметь сильное влияние на квантили надежности.

С ростом числа ремонтных устройств среднее время жизни системы также возрастает (табл. 7). Значения  $\mu_R$  при  $l=3$  в разы превышает среднее время жизни

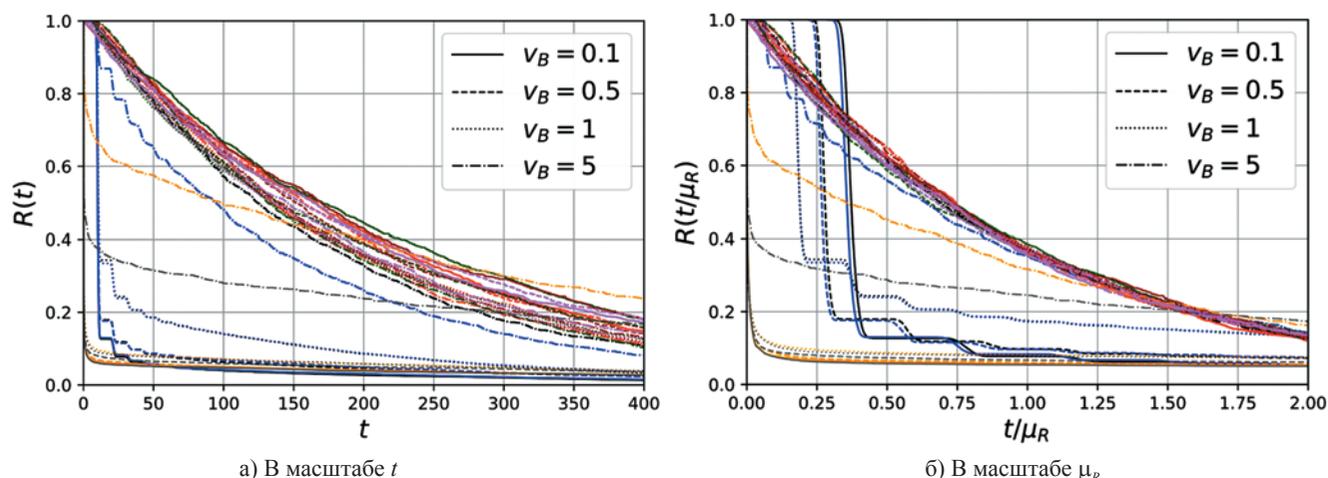


Рис. 4. Функция надежности системы  $\langle \Gamma_{5<10} | GI | 3 \rangle$

Табл. 7. Среднее время жизни  $\mu_R$  системы  $\langle \Gamma_{5<10}|GI|3 \rangle$

| $v_A =$   | 0,1      |         | 0,5      |         | 1        |         | 3        |         |
|-----------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| $B$       | $\Gamma$ | $GW$    | $\Gamma$ | $GW$    | $\Gamma$ | $GW$    | $\Gamma$ | $GW$    |
| $v_B=0,1$ | 27,346   | 28,515  | 224,189  | 236,483 | 213,703  | 227,693 | 32,138   | 31,289  |
| $v_B=0,5$ | 36,926   | 38,464  | 218,784  | 214,494 | 212,219  | 232,047 | 33,013   | 41,233  |
| $v_B=1$   | 56,533   | 56,546  | 195,805  | 193,731 | 190,473  | 191,829 | 44,670   | 44,214  |
| $v_B=5$   | 180,813  | 148,757 | 188,397  | 187,313 | 193,361  | 204,229 | 278,969  | 188,018 |

Табл. 8. Коэффициент вариации  $v_R$  времени жизни системы  $\langle \Gamma_{5<10}|GI|3 \rangle$

| $v_A =$   | 0,1      |       | 0,5      |       | 1        |       | 3        |       |
|-----------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| $B \sim$  | $\Gamma$ | $GW$  | $\Gamma$ | $GW$  | $\Gamma$ | $GW$  | $\Gamma$ | $GW$  |
| $v_B=0,1$ | 3,536    | 3,487 | 0,958    | 0,927 | 0,952    | 1,036 | 5,616    | 5,789 |
| $v_B=0,5$ | 3,115    | 3,138 | 0,952    | 1,038 | 0,979    | 1,011 | 5,699    | 5,143 |
| $v_B=1$   | 2,202    | 2,177 | 0,972    | 1,015 | 0,979    | 0,974 | 4,596    | 4,674 |
| $v_B=5$   | 0,968    | 1,123 | 0,914    | 0,937 | 0,889    | 0,957 | 1,590    | 2,211 |

Табл. 9. Квантили  $q_\gamma$  надежности системы  $\langle \Gamma_{5<10}|GI|3 \rangle$

| Распределение |             | $B \sim \Gamma$   |                   |                   |                   | $B \sim GW$       |                   |                   |                   |
|---------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $v_B =$       |             | 0,1               | 0,5               | 1                 | 5                 | 0,1               | 0,5               | 1                 | 5                 |
| $v_A=0,1$     | $q_{0,9}$   | 9,476             | 9,550             | 9,689             | 15,199            | 9,464             | 9,558             | 9,673             | 10,936            |
|               | $q_{0,99}$  | 9,022             | 9,086             | 9,183             | 10,333            | 9,031             | 9,096             | 9,202             | 9,903             |
|               | $q_{0,999}$ | 8,751             | 8,799             | 8,778             | 9,251             | 8,728             | 8,720             | 8,908             | 9,366             |
| $v_A=0,5$     | $q_{0,9}$   | 31,439            | 28,263            | 26,587            | 33,156            | 26,036            | 24,143            | 22,682            | 33,116            |
|               | $q_{0,99}$  | 8,948             | 8,325             | 8,213             | 11,605            | 7,989             | 8,469             | 7,279             | 13,912            |
|               | $q_{0,999}$ | 6,328             | 6,744             | 5,959             | 9,270             | 5,649             | 5,627             | 6,076             | 8,837             |
| $v_A=1$       | $q_{0,9}$   | 28,582            | 24,934            | 20,717            | 30,105            | 20,598            | 25,523            | 21,159            | 29,453            |
|               | $q_{0,99}$  | 2,362             | 2,840             | 3,547             | 10,409            | 2,612             | 3,489             | 4,418             | 6,085             |
|               | $q_{0,999}$ | 0,836             | 1,242             | 1,056             | 6,127             | 1,445             | 0,889             | 1,056             | 3,449             |
| $v_A=3$       | $q_{0,9}$   | $4 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $10^{-1}$         | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ |
|               | $q_{0,99}$  | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $10^{-6}$         | $5 \cdot 10^{-5}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | $4 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ |
|               | $q_{0,999}$ | $3 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $3 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $9 \cdot 10^{-9}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-8}$ |

Табл. 10. Квантили  $q_\gamma$  надежности системы  $\langle \Gamma_{5<10}|GI|3 \rangle$  в масштабе  $\mu_R$

| Распределение |             | $B \sim \Gamma$    |                    |                    |                   | $B \sim GW$        |                    |                    |                    |
|---------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $v_B =$       |             | 0,1                | 0,5                | 1                  | 5                 | 0,1                | 0,5                | 1                  | 5                  |
| $v_A=0,1$     | $q_{0,9}$   | 0,346              | 0,259              | 0,171              | 0,139             | 0,332              | 0,248              | 0,171              | 0,074              |
|               | $q_{0,99}$  | 0,329              | 0,246              | 0,162              | 0,057             | 0,317              | 0,236              | 0,163              | 0,067              |
|               | $q_{0,999}$ | 0,320              | 0,238              | 0,155              | 0,051             | 0,306              | 0,227              | 0,158              | 0,063              |
| $v_A=0,5$     | $q_{0,9}$   | 0,140              | 0,129              | 0,136              | 0,176             | 0,110              | 0,113              | 0,117              | 0,177              |
|               | $q_{0,99}$  | 0,039              | 0,038              | 0,042              | 0,061             | 0,034              | 0,039              | 0,038              | 0,074              |
|               | $q_{0,999}$ | 0,028              | 0,030              | 0,030              | 0,049             | 0,028              | 0,026              | 0,031              | 0,047              |
| $v_A=1$       | $q_{0,9}$   | 0,123              | 0,117              | 0,109              | 0,156             | 0,090              | 0,109              | 0,110              | 0,144              |
|               | $q_{0,99}$  | 0,010              | 0,013              | 0,019              | 0,054             | 0,011              | 0,015              | 0,023              | 0,029              |
|               | $q_{0,999}$ | 0,004              | 0,006              | 0,006              | 0,032             | 0,006              | 0,004              | 0,006              | 0,017              |
| $v_A=3$       | $q_{0,9}$   | $10^{-5}$          | $10^{-5}$          | $7 \cdot 10^{-6}$  | $4 \cdot 10^{-4}$ | $10^{-5}$          | $9 \cdot 10^{-6}$  | $9 \cdot 10^{-6}$  | $2 \cdot 10^{-6}$  |
|               | $q_{0,99}$  | $7 \cdot 10^{-8}$  | $8 \cdot 10^{-8}$  | $3 \cdot 10^{-8}$  | $2 \cdot 10^{-7}$ | $9 \cdot 10^{-8}$  | $9 \cdot 10^{-9}$  | $7 \cdot 10^{-8}$  | $9 \cdot 10^{-9}$  |
|               | $q_{0,999}$ | $9 \cdot 10^{-10}$ | $5 \cdot 10^{-10}$ | $8 \cdot 10^{-10}$ | $6 \cdot 10^{-9}$ | $6 \cdot 10^{-10}$ | $2 \cdot 10^{-10}$ | $5 \cdot 10^{-10}$ | $2 \cdot 10^{-10}$ |

аналогичной системы при  $l=1$ . Корреляция между значениями  $v_A$ ,  $v_B$  и  $\mu_R$  аналогична результатам табл. 3. При этом также наблюдается слабая чувствительность этой характеристики к виду распределения времени ремонта компонентов и сильная чувствительность к

значениям коэффициента вариации в.б.р.  $v_A$  и ремонта  $v_B$  компонентов.

В табл. 8 представлены результаты оценки коэффициента вариации  $v_R$  времени жизни системы. Аналогично результатам при  $l=1$  значения коэффициента вариации  $v_R$

зависят от  $v_A$  и  $v_B$ . При  $v_A=1, 0,5$  коэффициент вариации системы  $v_R$  достаточно близок друг к другу при изменении значений  $v_B$  и вида распределения времени ремонта  $B$ . Поведение  $v_R$  при  $v_A=0,1$  противоположно результатам табл. 4. С ростом  $v_B$  коэффициент вариации системы становится меньше. При  $v_A=3$  он также уменьшается, как и при  $l=1$ .

Число ремонтных устройств сильно влияет на поведение функции надежности и среднее время жизни системы. Очевидно, что квантили надежности также чувствительны к этому параметру (табл. 9). Согласно представленным результатам квантили надежности чувствительны к значению коэффициента вариации  $v_B$  времени ремонта. Однако это влияние имеет нелинейный характер. При  $v_A=0,1$  с ростом  $v_B$  квантили надежности также растут, но при  $v_A \neq 0,1$  значения  $q_l$  сначала уменьшаются, а затем при наибольшем значении  $v_B=5$  возрастают. Квантили надежности также чувствительны и к значениям коэффициента вариации в.б.р.  $v_A$ . При этом наибольшее значение рассматриваемых квантилей  $q_{0,9}, q_{0,99}, q_{0,999}$  достигается при  $v_A=0,5, v_B=5$ .

Из рис. 4, б) также видно, что значения квантилей надежности в масштабе среднего времени жизни системы зависят от параметра  $l$  (табл. 10). Здесь значения  $q_l$  в разы меньше значений, представленных в табл. 6. При этом корреляция между  $v_A, v_B$  и  $q_l$  в масштабе  $\mu_R$  аналогична предыдущему примеру.

## Заключение

Во второй части работы на основе результатов ее первой части численными методами проведен анализ чувствительности функции надежности системы к виду распределений в.б.р. и ремонта ее элементов и их параметров. Отмечается незначительная чувствительность к виду соответствующих распределений и значительная чувствительность к их коэффициенту вариации.

Естественно, на основе численного анализа отдельных примеров нельзя делать абсолютных выводов относительно вида и величины чувствительности, но приведенные результаты должны насторожить практиков при выводах о надежности систем только по первым моментам в.б.р. и ремонта ее элементов.

## Библиографический список

1. Рыков В.В., Иванова Н.М. О функции надежности системы  $\langle GI_{k:n}|GI| \rangle$ . Часть I. Аналитические результаты // Надежность. 2024. № 3. С. 34-43. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-3-34-43

2. Rykov V., Kozyrev D., Filimonov A. et al. On reliability of a k-out-of-n system with general repair time distribution // Probability in the Engineering and Informational Sciences. 2021. Vol. 35. No 4. Pp. 885-902. DOI: 10.1017/S0269964820000285

## References

1. Rykov V.V., Ivanova N.M. On the dependability function of the  $\langle GI_{k:n}|GI| \rangle$  system. Part I. Analytical results. *Dependability* 2024;24(3):34-43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-34-43>. (in Russ.)

2. Rykov V., Kozyrev D., Filimonov A. et al. On reliability of a k-out-of-n system with general repair time distribution. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 2021;35(4):885-902. DOI: 10.1017/S0269964820000285.

## Сведения об авторах

**Рыков Владимир Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, Москва, Российская Федерация, e-mail: vladimir\_rykov@mail.ru

**Иванова Ника Михайловна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем управления РАН, ул. Профсоюзная, д. 65, Москва, Российская Федерация, e-mail: nm\_ivanova@bk.ru

## About the authors

**Vladimir V. Rykov**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor, Gunkin University, 65, korp. 1 Leninsky prospekt, Moscow, Russian Federation, e-mail: vladimir\_rykov@mail.ru

**Nika M. Ivanova**, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya str., Moscow, Russian Federation, e-mail: nm\_ivanova@bk.ru

## Вклад авторов

**Рыков В.В.** сформулировал задачу исследования, разработал метод ее решения и получил аналитические результаты.

**Иванова Н.М.** разработала алгоритм имитационного моделирования и выполнила численный анализ.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Об анализе временных рядов аварий и инцидентов на опасных производственных объектах

## On analysing time series of accidents and incidents at hazardous production facilities

Бочков А.В.<sup>1\*</sup>, Киркин М.А.<sup>2</sup>  
Bochkov A.V.<sup>1\*</sup>, Kirkin M.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва

<sup>1</sup> JSC NIIAS, Russian Federation, Moscow

<sup>2</sup> ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> PJSC Gazprom, Saint Petersburg, Russian Federation

\* a.bochkov@vniias.ru



Бочков А.В.



Киркин М.А.

**Резюме.** Безопасное функционирование любых сложных распределенных систем во многом определяется уровнем развития инструментов анализа и прогнозирования происходящих на них событий. Помимо внешних факторов опасности, значимые угрозы создают т.н. опасные производственные объекты (ОПО). Аварии на таких объектах – предмет постоянного анализа и заботы эксплуатирующих организаций. Вместе с тем, статистика аварийности, накопленная за время функционирования таких объектов, часто неоднородна. Аварии и инциденты на ОПО происходят в разное время, при различном прогнозном фоне, что затрудняет построение и верификацию цифровых моделей подобных объектов. В настоящей работе предлагается алгоритм первичной обработки временных рядов наблюдений для выделения данных, которые можно использовать в дальнейшем для построения и обучения прогнозных моделей с требуемой точностью. Предлагаемый подход может быть реализован средствами языка R, который во многом стал стандартом для статистических расчетов.

**Abstract.** Safe operation of any complex distributed systems is largely defined by the quality of the event analysis and prediction tools. Aside from the external hazards, the so-called hazardous production facilities (HPFs) pose significant threats. Accidents at such facilities are a subject of constant analysis and concern of operating organisations. At the same time, the accident statistics accumulated over the period of operation of such facilities are often heterogeneous. Accidents and incidents at HPFs occur at different times, against different forecast backgrounds, which complicates the construction and verification of digital models of such facilities. This paper proposes an algorithm for preprocessing time series of observations to extract data that can be subsequently used to build and train predictive models with the required accuracy. The proposed approach can be implemented by means of the R language, that in many respects has become a standard for statistical calculations.

**Ключевые слова:** временной ряд, аварии, инциденты, статистика Фишера, прогноз временного ряда

**Keywords:** time series, accidents, incidents, Fisher statistics, time series prediction

**Для цитирования:** Бочков А.В., Киркин М.А. Об анализе временных рядов аварий и инцидентов на опасных производственных объектах // Надежность. 2024. №4. С. 12-19. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-12-19>

**For citation:** Bochkov A.V., Kirkin M.A. On analysing time series of accidents and incidents at hazardous production facilities. Dependability 2024;4:12-19. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-12-19>

**Поступила:** 18.05.2024 / **После доработки:** 02.09.2024 / **К печати:** 18.11.2024

**Received on:** 18.05.2024 / **Revised on:** 02.09.2024 / **For printing:** 18.11.2024

## Введение

Анализ временных рядов аварий и инцидентов на опасных производственных объектах (ОПО) имеет решающее значение для обеспечения промышленной безопасности и снижения рисков [1, 2]. Для оценки риска аварий и управления чрезвычайными ситуациями разработаны различные методологии и технологии [3, 4]. К ним относятся использование машинного обучения и методов анализа больших данных для прогнозирования и предотвращения серьезных потрясений [5]. Кроме того, предложена концепция цифрового двойника ОПО, предполагающая построение виртуальной модели для моделирования и мониторинга работы объекта и мер безопасности [6]. Эти усовершенствования направлены на улучшение мониторинга, реагирования и управления авариями и инцидентами на ОПО и, в итоге, на обеспечение безопасности жизни и имущества людей [7].

Анализ временных рядов редких событий включает несколько ключевых особенностей. Во-первых, для прогнозирования и анализа таких редких случаев требуется использование специальных методов [8]. Во-вторых, проблема классового дисбаланса является распространенной в моделях прогнозирования временных рядов редких событий, и для ее решения были изучены различные способы, такие как занижение выборки, перевыборка и неправильная классификация весов [9]. Кроме того, было признано эффективным использование коллективных решений с помощью наборов алгоритмов распознавания, прогнозирование редких событий на основе предыдущей динамики признаков [10]. Кроме того, бинарная логит-модель, основанная на максимальном правдоподобии, обычно используемая в социальных науках, может давать смещенные оценки параметров и переоценивать их при работе с редкими событиями, что требует использования альтернативных аналитических подходов, таких как коррекция смещения первого порядка и точный условный вывод [11]. Наконец, анализ редких событий в данных временных рядов часто требует применения методов, специально разработанных для работы с редкими явлениями, таких, например, как метод емкости, основанный на теории случайных процессов [12].

Статистические исследования нерегулярных временных рядов рассматриваются во многих работах. Так, в [13] предлагается комплексное решение, учитывающее временные неравномерности в многомерных последовательных данных. При построении модели учитывается время получения результатов наблюдений. В [14] представлена новая модель авторегрессионных скользящих средних первого порядка для анализа дискретных временных рядов, наблюдаемых в неравномерно распределенные промежутки времени, и демонстрирующая ее применимость на реальных примерах [15]. В работах [16, 17] подчеркивается важность учета нерегулярной временной выборки и временной структуры данных временных рядов в статистических исследованиях. Эти статьи обсуждают полуконтролируемое обучение дан-

ных временных рядов, а в одной из них предлагается концепция под названием iTimes, позволяющая самостоятельно изучать временную структуру немаркированных временных рядов.

Уже из вышесказанного можно судить, что тема, затрагиваемая в данной статье, является актуальной и привлекает интерес самых разных исследователей.

## 1. Первичная обработка данных

Для анализа использованы данные по авариям и инцидентам условного ОПО, а также информация по программам и мероприятиям, направленным на улучшение промышленной безопасности, данные по внеплановым потерям и т.д. Для удобства и скорости обработки все полученные статистические данные были размещены в таблицах реляционной базы данных.

Чтобы сохранить однородность и репрезентативность выборки, было принято решение рассмотреть данные по авариям и инцидентам на объекте исследования как однородную и в то же время самую многочисленную выборку. Среди событий на объекте исследования отдельно выделяются аварии и инциденты, однако для статистической обработки различия между авариями и инцидентами являются несущественными. Принято решение при статистической обработке данных рассматривать аварии и инциденты на объекте исследования как равнозначные события.

Первичная обработка данных заключалась в переходе от григорианских к юлианским датам, что позволило создать временной ряд со сквозной и неповторяющейся нумерацией по дням. Этот ряд представлен на рис. 1.

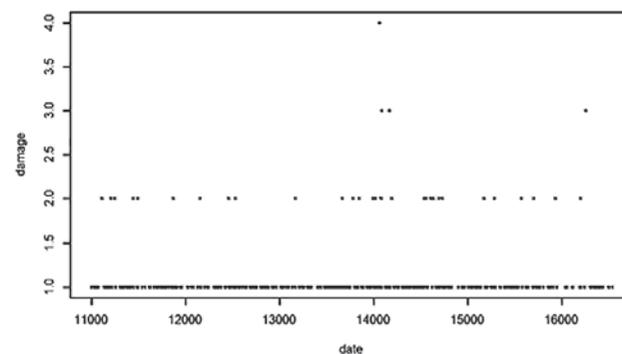


Рис. 1. Временной ряд аварий и инцидентов, переведенный в юлианские дни

Для статистической обработки и анализа был использован язык R – язык программирования для статистической обработки данных и работы с графикой, а также свободная программная среда вычислений. R был разработан сотрудниками статистического факультета Оклендского университета Россом Айхэкой и Робертом Джентлменом (первая буква их имен – R). Язык R широко используется как статистическое программное обеспечение для анализа данных и фактически стал стандартом для статистических программ. R доступен под лицензией GNU GPL и распространяется в виде исходных кодов, а также откомпилированных приложений под ряд операци-

онных систем: FreeBSD, Solaris и другие дистрибутивы Unix и Linux, Microsoft Windows, Mac OS X. Язык R поддерживает широкий спектр статистических и численных методов и обладает хорошей расширяемостью с помощью пакетов. Пакеты представляют собой библиотеки для работы специфических функций или специальных областей применения. В базовую поставку R включен основной набор пакетов, а всего доступно более 5000 пакетов. R обладает отличными графическими возможностями по отражению результатов анализа.

## 2. Статистические исследования нерегулярных временных рядов

Так как временной интервал между событиями неодинаков, то для того чтобы выделить какие-либо зависимости, необходимо использовать специальный математический аппарат. Например, периодограммы Ломба-Скаргла позволяет выделять периоды на данных с неравномерным интервалом между событиями или равномерных интервалах, но с пропущенными данными. Метод Ломба-Скаргла позволяет осуществить спектральный анализ непосредственно над неравномерно дискретным сигналом. В его основе лежит МНК-аппроксимация сигнала гармоническими функциями. Отличительной особенностью метода является то, что оценка данных происходит по самим точкам отсчетов, а не по временным промежуткам, что позволяет сигналу иметь переменный шаг дискретизации.

На рис. 2 представлена периодограмма Ломба-Скаргла для ряда, приведенного на рис. 1. Периодограмма показывает вероятность существования периода в анализируемых данных. По оси абсцисс отложены значения периода в днях, а по оси ординат вероятность существования этого периода. Чем выше пик, тем больше вероятность периода. Видны 7-дневный пик и пик равный приблизительно 78 дням. Пики с периодами меньше 7-ми дней, скорее всего, являются артефактами и не имеют статистической значимости.

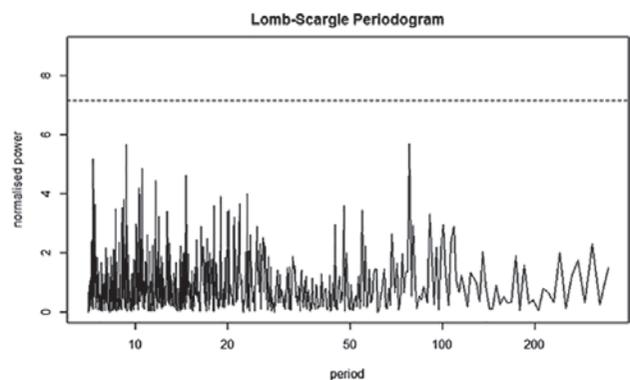


Рис. 2. Периодограмма Ломба-Скаргла для нерегулярного временного ряда аварий и инцидентов

Таким образом, из периодограммы на рис. 2 видно, что существуют два почти одинаково значимых перио-

да для ряда аварий и инцидентов. Кроме этих главных периодов виден еще десяток второстепенных максимумов с чуть меньшей амплитудой на значениях от 7 до 30 дней, что показывает сложность временного ряда аварий и инцидентов.

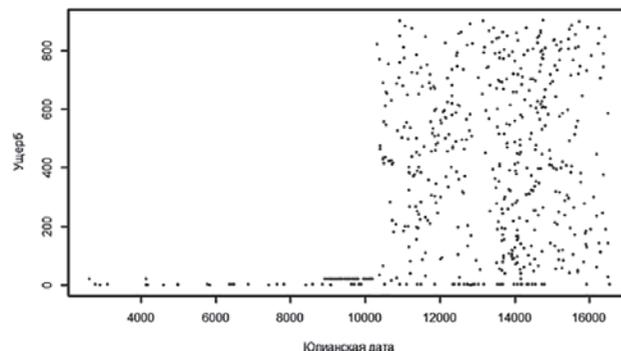


Рис. 3. Полный временной ряд ущербов, возникающих при событиях на объекте исследования

Помимо частотности аварий и инцидентов также играет важную роль ущерб, возникающий при событиях на объекте исследования. Так, если создать временной ряд ущербов (см. рис. 3), то видно, что ущерб событий до 2000 года (2000 год соответствует юлианской дате около 11 000) значения ущерба при событиях на объекте исследования имеют другое распределение и не могут быть учтены корректно.

Освобожденный от этих данных временной ряд представлен на рис. 4.

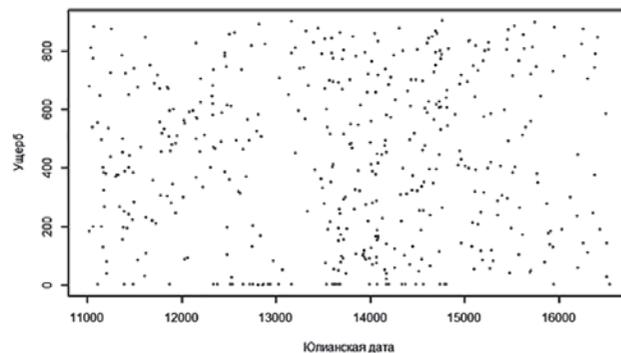


Рис. 4. Сокращенный временной ряд ущербов от событий на объекте исследования

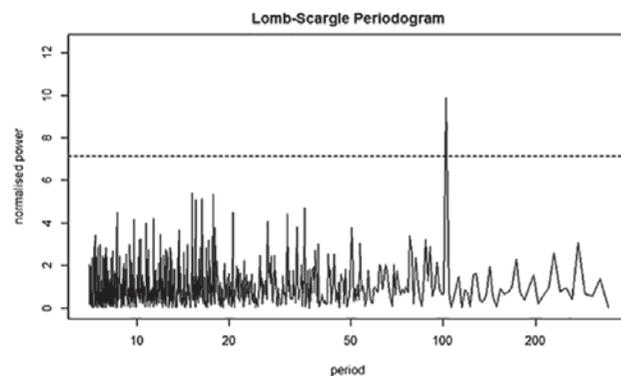


Рис. 5. Периодограмма Ломба-Скаргла для сокращенного временного ряда ущербов от событий на объекте исследования

Соответствующая периодограмма Ломба-Скаргла для этого ряда однозначно указывает на наличие у ряда ущербов статистически значимого периода в 102,17 дня (см. рис. 5). Другими словами, ущерб от аварий и инцидентов имеет статистически значимую периодичность около 102 дней, что позволяет говорить о прогнозировании и, по возможности, снижении этого ущерба.

### 3. Регуляризация временного ряда

Математический инструментарий для работы с событиями, между которыми разные временные промежутки, скуден и сложен. Для того, чтобы использовать всю «силу» современных методов работы с временными рядами, необходимо перейти к ряду, в котором события разделены равными промежутками времени. Такие временные ряды называются регулярными. Для регуляризации временного ряда событий на объекте исследования было произведено разбиение на временные интервалы (бины) и просуммированы все события попавшие внутрь данного бина.

Получившийся временной ряд обладает свойством регулярности, то есть события разделены равными временными интервалами. Регулярный временной ряд аварий и инцидентов на объекте исследования был сформирован путем суммирования событий, которые произошли внутри каждого квартала, начиная с 1 квартала 2000 года (рис. 6). Дата начала временного ряда была выбрана для того, чтобы опираться на найденную ранее периодичность.

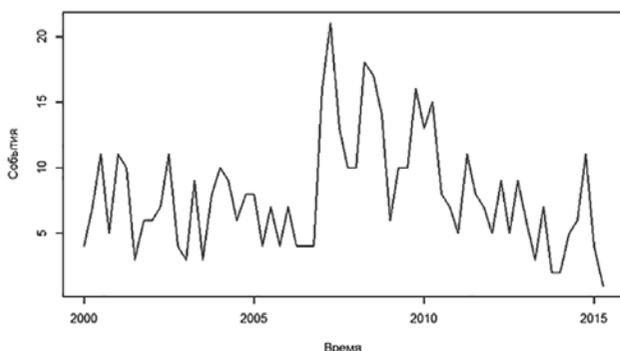


Рис. 6. Регулярный временной ряда аварий и инцидентов на объекте исследования

### 4. Определение момента структурных изменения регулярного временного ряда

Одной из основных задач при работе с временными рядами, описывающими те или иные показатели, является своевременное определение того момента, когда изменения временного ряда уже нельзя объяснить случайным выбросом, а нужно констатировать о структурных изменениях временного ряда.

Этот момент времени сопровождается значительными изменениями ряда факторов, оказывающих сильное воздействие на изучаемый показатель. Чаще всего эти изменения вызваны изменениями в общеэкономической ситу-

ации или событиями глобального характера, приведшими к изменению структуры аварийности. Если исследуемый временной ряд включает в себя соответствующий момент времени, то одной из задач его изучения становится выяснение вопроса о том, значительно ли повлияли общие структурные изменения на характер этой тенденции. Для оценки значимости модели в целом используется статистика Фишера (так называемая,  $F$ -статистика).

Исследовались точки структурных изменений на временном ряде событий на объекте исследования. В данном случае это точки, которые могут показать начало тренда на снижение или повышение. На рис. 7 приведена статистика Фишера для временного ряда аварий и инцидентов на объекте исследования, начиная с 1 января 2000 года.

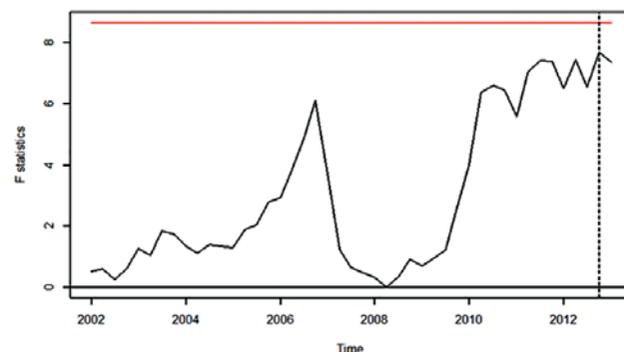


Рис. 7. Статистика Фишера для регулярного временного ряда событий на объекте исследования. Пунктиром обозначено максимальное значение статистики

Чем выше значение статистики, тем более вероятно, что произошли структурные изменения временного ряда.

Из рис. 7 видно, что существует несколько вторичных максимумов статистики Фишера в области 2007 года и около 2012-2013 годов, и основной максимум, пришедшийся на 1 квартал 2014 года. Этот момент и соответствует точке структурных изменений регулярного временного ряда событий на объекте исследования. То есть, если снижение аварийности до этого момента можно было с какой-то вероятностью объяснить как случайным понижением предыдущего закона, то после этой точки тренд на снижение уже статистически значим.

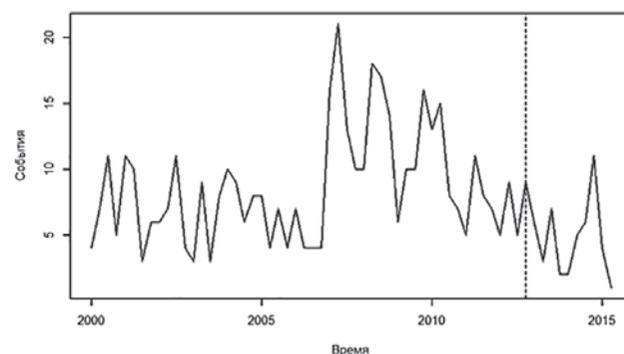


Рис. 8. Регулярный временной ряда событий на объекте исследования. Момент структурного изменения временного ряда, соответствующий максимуму статистики отмечен пунктирной линией

На рис. 8 показан этот момент и можно увидеть, что нисходящий тренд, наметившийся в 2010, становится статистически значимым с начала 2014. Причем любой тренд, говорящий о снижении аварийности до этого момента, не является статистически значимым.

Таким образом, выявление структурных изменений и обнаружение моменты смены тренда – это одна из важных задач мониторинга аварийности, так как позволяет отличить изменения структуры аварийности от случайного выброса и своевременно принять меры.

## 5. Кросс-корреляция с мерами по предотвращению инцидентов на объекте исследования

Одним из инструментов для работы с регулярными временными рядами является линейная модель параметров с запаздываниями. Временной ряд представляется в виде линейной комбинации временных рядов различных параметров, которые влияют на поведение основного ряда. При этом учитывается, что влияние может происходить не мгновенно, а с опережением или запаздыванием на некоторый временной промежуток (лаг). В некоторых случаях наличие временного лага является очевидным: например, в цепи «хищник – жертва» вспышка популяции хищника происходит через определенный промежуток после вспышки популяции жертвы, после чего происходит снижение численности с тем же временным лагом. Но, в большинстве случаев, нельзя так просто судить о наличии временного лага и тем более о конкретной его длине. Для составления действующей модели временного ряда событий на объекте исследования, необходимо определить степень влияния мероприятий по обеспечению производственной безопасности на аварийность и с каким запаздыванием это влияние проявляется.

Взаимная корреляционная функция, или кросс-корреляционная функция (ККФ) определяется для двух стационарных временных рядов как коэффициент корреляции между  $x(t)$  и  $y(t+k)$  в зависимости от  $k$ . Наличие пиков в ККФ указывает на наличие временного лага временных рядов.

На основании данных по следующим показателям:

- были составлены регулярные временные ряды и рассчитана ККФ;
- организация и осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности;
- страхование общей гражданской ответственности;
- страхование гражданской ответственности организаций, эксплуатирующих ОПО (тип DE);
- обязательное страхование гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на ОПО (тип NL);
- обучение, проведение учебно-тренировочных занятий, аттестация;
- приобретение нормативно-технической литературы;
- экспертиза технологического оборудования.

Результаты для первых трех факторов приведены на рис. 9–11.

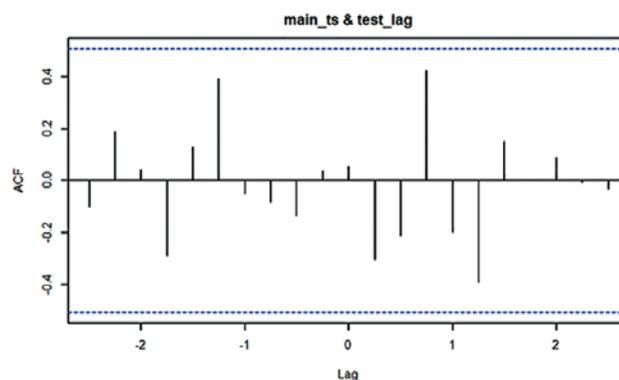


Рис. 9. ККФ для временного ряда параметра «Организация и осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности»

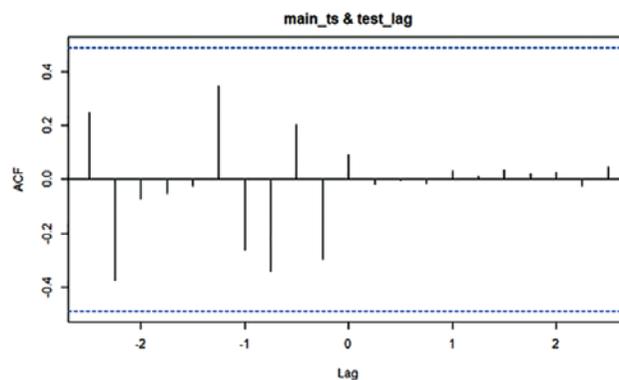


Рис. 10. ККФ для временного ряда параметра «Страхование общей гражданской ответственности»

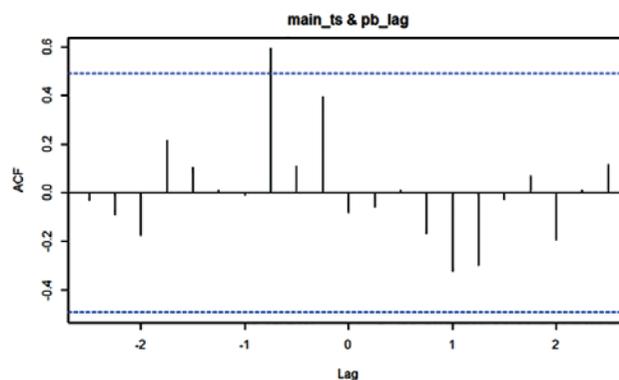


Рис. 11. ККФ для временного ряда параметра «Страхование гражданской ответственности организаций, эксплуатирующих ОПО (тип DE)»

Из анализа рис. 9–11 видно, что параметры «Организация и осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности» и «Страхование общей гражданской ответственности» не имеют статистически значимой корреляции ни на одном из лагов, в то время как временной ряд для «Страхование гражданской ответственности организаций, эксплуатирующих ОПО (тип DE)» имеет высокий коэффициент корреляции 0,6 с лагом в -1 квартал

(данные лага на графике – в единицах частоты, то есть 4 квартала за год).

Необходимо проанализировать все параметры, относящиеся к объекту исследования, чтобы на их основе составить линейную модель временного ряда аварий и инцидентов на основании вклада каждого параметра со своим временным лагом.

На рис. 12 представлен пример схемы для определения параметров линейной модели, где по горизонтальной оси представлены параметры модели, а по вертикальной оси – соответствие между полученной моделью и реальным временным рядом. Подобные схемы наглядно иллюстрируют, как изменяется адекватность модели при учете тех или иных параметров.

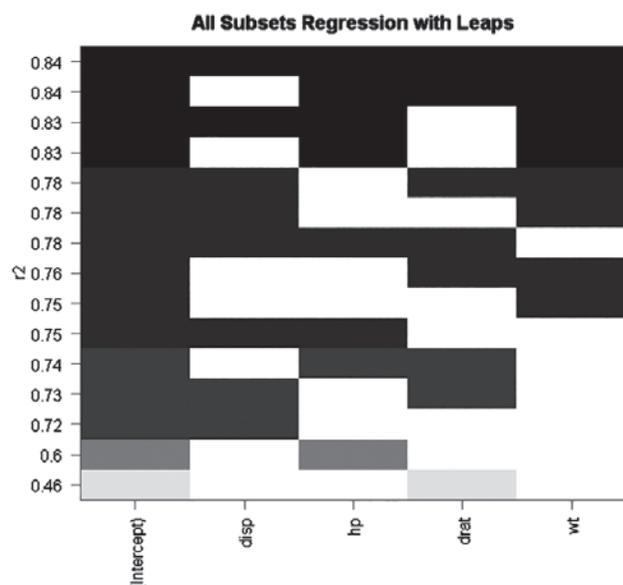


Рис. 12. Пример выбора компонентов модели временного ряда

Наличие значимой корреляции с временным лагом позволяет использовать значение параметра для уточнения прогноза по авариям и инцидентам. То есть данный параметр имеет предикативное свойство. Зная значения этого параметра можно предсказывать изменение поведения временного ряда аварий и инцидентов на объекте исследования в ту или иную сторону.

## 6. Прогноз временного ряда

Процедуры оценки параметров и прогнозирования предполагают, что математическая модель процесса известна. В реальных данных часто нет отчетливо выраженных регулярных составляющих. Отдельные наблюдения содержат значительную ошибку, тогда как требуется не только выделить регулярные компоненты, но также построить прогноз.

Методология ARIMA, разработанная Боксом и Дженкинсом [16] в 1976 году, позволяет это сделать. Данный метод чрезвычайно популярен во многих приложениях, и практика подтвердила его мощь и гибкость. Однако из-за мощьности и гибкости, ARIMA – сложный метод.

Его не так просто использовать, и требуется большая практика, чтобы овладеть им. Хотя часто он дает удовлетворительные результаты, они во многом зависят от квалификации пользователя [17].

Цель сезонной декомпозиции и корректировки состоит в том, чтобы разложить ряд на составляющую тренда, сезонную компоненту и оставшуюся нерегулярную составляющую. «Классический» прием, позволяющий выполнить такую декомпозицию, известен как метод Census I. Этот метод описывается и обсуждается в работах [18, 19]. Основная идея сезонной декомпозиции проста. В общем случае временной ряд типа того, который описан выше, можно представить себе состоящим из четырех различных компонент:

- 1) сезонной компоненты (обозначается  $S(t)$ , где  $t$  обозначает момент времени),
- 2) тренда ( $T(t)$ ),
- 3) циклической компоненты ( $C(t)$ )
- 4) случайной, нерегулярной компоненты или флуктуации ( $I(t)$ ).

Разница между циклической и сезонной компонентой состоит в том, что последняя имеет регулярную (сезонную) периодичность, тогда как циклические факторы обычно имеют более длительный эффект, который к тому же меняется от цикла к циклу. В методе Census I тренд и циклическую компоненту обычно объединяют в одну тренд-циклическую компоненту ( $TC(t)$ ). Конкретные функциональные взаимосвязи между этими компонентами могут иметь самый разный вид.

На рис. 13 представлена декомпозиция временного ряда аварий и инцидентов на объекте исследования выполненная методом Census I. На верхнем фрагменте графика приведем сам временной ряд. Далее приведены графики тренда, сезонной компоненты и случайного шума, соответственно.

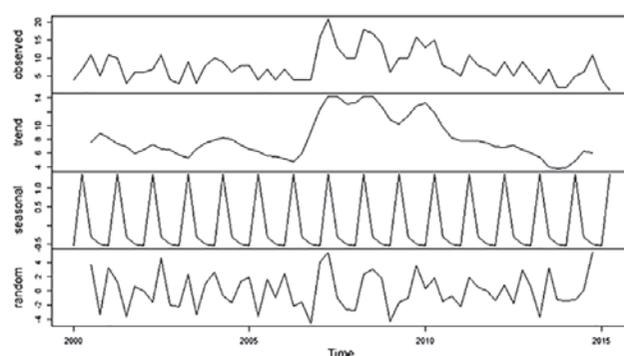


Рис. 13. Декомпозиция временного ряда событий на объекте исследования

Из анализа графиков на рис. 13 видно, что сезонная компонента мала, а основные изменения временного ряда вносит тренд-циклическая компонента. Таким образом, сезонная декомпозиция временного ряда позволяет прогнозировать количество аварий и инцидентов (не разделяя их друг от друга) на временной интервал в несколько кварталов (см. рис. 14).

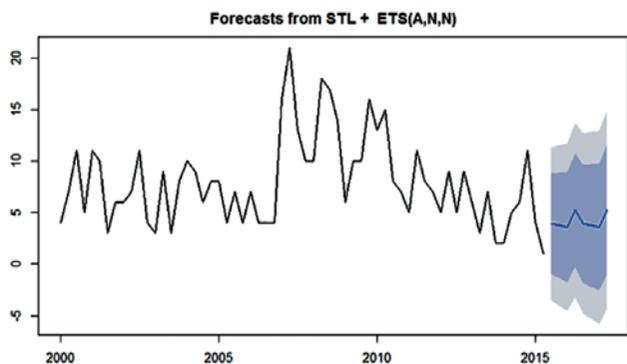


Рис. 14. Модель временного ряда аварий и инцидентов на объекте исследования и их вероятностный прогноз. Темно-серым обозначен доверительный интервал 80 %, светло-серым обозначен доверительный интервал 95%

Тренд-циклическая и сезонная компонента ограничивают коридор доверительных значений, обозначенных на рисунке серыми областями. Так, темно-серая область показывает, какое количество аварий и инцидентов на объекте исследования будет с вероятностью 80%, а светло-серая – с вероятностью 95%.

## Заключение

Показанная в статье последовательность действий с условными данными, полученными из временного ряда событий на ОПО, без сомнения требует адаптации к реальным данным и может служить только примером того, как нужно выделять из имеющегося набора данные, действительно пригодные для построения моделей и прогнозирования.

## Библиографический список

1. Бочков А.В. Проблемы оценки опасностей и управления рисками объектов критически важной инфраструктуры Группы «Газпром»: аналитический обзор // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2018. № 2(34). С. 51-87.
2. Бочков А.В., Сафонов В.С. Специфика анализа и оценок показателей риска редких событий на опасных производственных объектах // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2020. № 1(42). С. 84-95.
3. Бочков А.В. Использование метода анализа иерархий для целей категорирования критически важных объектов по степени совокупного ущерба и риску противоправных действий // Проблемы анализа риска. 2008. Т. 5. № 4. С. 6-13.
4. Печеркин А.С., Гражданкин А.И., Разумняк Н.Л. Тенденции динамики фоновых показателей опасностей аварий на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 11. С. 14-19. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-11-14-19
5. Guo S., Wang Z., Cui K. et al. Analysis of a hazardous factory explosion accident // SHS web of conferences. 2023. Vol. 166. A.n. 01053. 5 p. DOI: 10.1051/shsconf/202316601053

6. Cadei L., Rossi G., Lancia L. et al. Hazardous Events Prevention and Management Through an Integrated Machine Learning and Big Data Analytics Framework // SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show, Muscat, Oman, March 2022. DOI: 10.2118/200110-ms

7. Немчинов Д.В., Селиверстова А.Н., Немчинова А.Л. Управление рисками аварийных ситуаций на опасном производственном объекте (установка каталитического реформинга) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. Т. 2022. № 3. С. 22-29. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-22-29

8. Basu T., Menzer O., Ward J. et al. A Novel Implementation of Siamese Type Neural Networks in Predicting Rare Fluctuations in Financial Time Series // Risks. 2022. Vol. 10(2). P. 39. DOI: 10.3390/risks10020039

9. Ahmadzadeh A., Aydin B., Kempton D.J. et al. Rare-Event Time Series Prediction: A Case Study of Solar Flare Forecasting // 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA). 2019. DOI: 10.1109/ICMLA.2019.00293

10. Zhuravlev Yu.I., Senko O.V., Bondarenko N.N. et al. A Method for Predicting Rare Events by Multidimensional Time Series with the Use of Collective Methods // Pattern Recognition and Image Analysis. 2019. Vol. 29. Issue 4. Pp. 763-768. DOI: 10.1134/S1054661819040217

11. Leitgöb H. (2020). Analysis of rare events. In book: SAGE Research Methods Foundations. SAGE Publications Ltd, 2020. DOI: 10.4135/9781526421036863804

12. Кораблев Ю.А., Голованова П.С., Кострица Т.А. Емкостный метод анализа редких событий в сфере услуг // Актуальные проблемы экономической теории. 2020. № 3. С. 132-142. DOI: 10.33293/1609-1442-2020-3(90)-132-142

13. Li Y., Leung C.H., Wu Q. Probabilistic Learning of Multivariate Time Series with Temporal Irregularity (June 16, 2023) [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2306.09147> (дата обращения 23.09.2024). DOI: 10.48550/arxiv.2306.09147

14. Jhin S.Y., Lee J., Park N. (2023). Precursor-of-Anomaly Detection for Irregular Time Series (October 13, 2023) [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2306.15489> (дата обращения: 23.09.2024). DOI: 10.1145/3580305.3599469

15. Ojeda C., Palma W., Eyheramendy S. et al. A Novel First-Order Autoregressive Moving Average Model to Analyze Discrete-Time Series Irregularly Observed // Theory and Applications of Time Series Analysis and Forecasting: Selected contributions from ITISE 2021: Conference proceedings. 2023. Pp. 91-103. DOI: 10.1007/978-3-031-14197-3\_7

16. Liu X., Zhang F., Liu H. et al. iTimes: Investigating Semisupervised Time Series Classification via Irregular Time Sampling // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2023. Vol. 19. Issue 5. Pp. 6930-6938. DOI: 10.1109/tii.2022.3199374

17. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Том 2. М.: Юнити-Дана, 2001. 432 с.

18. Makridakis S.G., Wheelwright S.C., McGee V.E. (1983) *Forecasting: Methods and Applications*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1983. 926 p.

19. Makridakis S.G., Wheelwright S.C. *Forecasting Methods for Management*. 5th ed. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1989. 480 p.

## References

1. Bochkov A.V. [Problems of hazard estimation and risk management of critical infrastructure facilities of the Gazprom Group: an analytical review]. *Vesti gazovoy Nauki* 2018;2(34):51-87. (in Russ.)

2. Bochkov A.V. Safonov V.S. Special analysis and assessment of risk indicators for rare events in regard to dangerous industrial facilities. *Vesti Gazovoy Nauki* 2020;1(42):84-95. (in Russ.)

3. Bochkov A.V. [Using hierarchy analysis for categorising critical facilities in terms of the cumulative damage and the risk of illegal actions]. *Issues of Risk Analysis* 2008;5(4):6-13. (in Russ.)

4. Pecherkin A.S., Grazhdankin A.I., Razumnyak N.L. Trends in the Dynamics of Background Indicators of Accident Hazards at Hazardous Production Facilities. *Occupational safety in industry* 2022;11:14-19. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-11-14-19. (in Russ.)

5. Guo S., Wang Z., Cui K. et al. Analysis of a hazardous factory explosion accident. *SHS web of conferences* 2023;166:01053. DOI: 10.1051/shsconf/202316601053.

6. Cadei L., Rossi G., Lancia L. et al. Hazardous Events Prevention and Management Through an Integrated Machine Learning and Big Data Analytics Framework. SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show. Muscat (Oman); March 2022. DOI: 10.2118/200110-ms.

7. Nemchinov D.V., Seliverstova A.N., Nemchinova A.L. Emergency risk management at hazardous production facilities (catalytic reforming unit). *Vestnik ASTU. Series: Management, computer science and informatics* 2022;3:22-29. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-22-29. (in Russ.)

8. Basu T., Menzer O., Ward J. et al. A Novel Implementation of Siamese Type Neural Networks in Predicting Rare Fluctuations in Financial Time Series. *Risks* 2022;10(2):39. DOI: 10.3390/risks10020039.

9. Ahmadzadeh A., Aydin B., Kempton D.J. et al. Rare-Event Time Series Prediction: A Case Study of Solar Flare Forecasting. 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA); 2019. DOI: 10.1109/ICMLA.2019.00293.

10. Zhuravlev Yu.I., Senko O.V., Bondarenko N.N. et al. A Method for Predicting Rare Events by Multidimensional Time Series with the Use of Collective Methods. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2019;29:763-768. DOI: 10.1134/S1054661819040217.

11. Leitgöb H. Analysis of rare events. In: SAGE Research Methods Foundations. SAGE Publications Ltd.; 2020. DOI: 10.4135/9781526421036863804.

12. Korablev Yu.A., Golovanova P.S., Kostritsa T.A. Capacity Method of Rare Events Analysis in the Area of Services. *Economics of Contemporary Russia* 2020;(3):132-142. (in Russ.) DOI: 10.33293/1609-1442-2020-3(90)-132-142.

13. Li Y., Leung C.H., Wu Q. Probabilistic Learning of Multivariate Time Series with Temporal Irregularity (June 16, 2023). (accessed 23.09.2024). Available at: <https://arxiv.org/abs/2306.09147>. DOI: 10.48550/arxiv.2306.09147.

14. Jhin S.Y., Lee J., Park N. (2023). Precursor-of-Anomaly Detection for Irregular Time Series (October 13, 2023). (accessed 23.09.2024). Available at: <https://arxiv.org/abs/2306.15489>. DOI: 10.1145/3580305.3599469.

15. Ojeda C., Palma W., Eyheramendy S. et al. A Novel First-Order Autoregressive Moving Average Model to Analyze Discrete-Time Series Irregularly Observed. In: *Theory and Applications of Time Series Analysis and Forecasting: Selected contributions from ITISE 2021: Conference proceedings; 2023*. Pp. 91-103. DOI: 10.1007/978-3-031-14197-3\_7.

16. Liu X., Zhang F., Liu H. et al. iTimes: Investigating Semisupervised Time Series Classification via Irregular Time Sampling. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2023;19(5):6930-6938. DOI: 10.1109/tii.2022.3199374.

17. Ayvazyan S.A. *Applied statistics. Fundamentals of econometrics*. Volume 2. Moscow: Unity-Dana; 2001. (in Russ.)

18. Makridakis S.G., Wheelwright S.C., McGee V.E. *Forecasting: Methods and Applications*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Ltd.; 1983.

19. Makridakis S.G., Wheelwright S.C. *Forecasting Methods for Management*. 5th ed. New York: John Wiley and Sons Ltd.; 1989.

## Сведения об авторах

**Бочков Александр Владимирович** – доктор технических наук, Ученый секретарь АО «НИИАС», ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 109029, e-mail: a.bochkov@vniias.ru

**Киркин Максим Александрович** – главный эксперт Департамента (В.И. Донцов) ПАО «Газпром». Адрес: Московский пр-т, д. 156, лит. А, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196105, e-mail: M.Kirkin@adm.gazprom.ru

## About the authors

**Alexander V. Bochkov**, Doctor of Engineering, Academic Secretary, JSC NIIAS, 27, bldg 1 Nizhegorodskaya str., Moscow, 109029, Russian Federation, e-mail: a.bochkov@vniias.ru

**Maksim A. Kirkin**, Chief Expert of Department (V.I. Dontsov), PJSC Gazprom, 156A Moskovsky pr-t, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: M.Kirkin@adm.gazprom.ru

## Вклад авторов

**Бочков А.В.** сформулировал задачу исследования, разработал метод ее решения и получил аналитические результаты.

**Киркин М.А.** разработал алгоритм имитационного моделирования и выполнил численный анализ.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Определение необходимого количества запасных частей в условиях ограниченного объема данных

## Defining the required number of spare parts under data constraints

Лейзгольд К.А.<sup>1\*</sup>, Бочкарев С.В.<sup>1</sup>  
Leyzgold K.A.<sup>1\*</sup>, Bochkarev S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Российская Федерация, Пермь

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

\* leizgold\_ka@pstu.ru



Лейзгольд К.А.



Бочкарев С.В.

**Резюме. Цель.** Целью работы является сокращение экономических издержек, связанных с простоем оборудования при выходе его из строя. Это особенно актуально для таких отраслей, как нефтедобывающая, в виду территориальной распределенности ремонтируемых объектов и удаленного расположения складов с запасными частями, что приводит к увеличению времени ремонта из-за ожидания нужной запчасти или экземпляра оборудования. В то же время на складе могут быть запчасти, которые в ближайшее время не пригодятся из-за нерационального их состава. **Методы.** Управление запасными частями оборудования, как правило, сводится к использованию вероятностных методов и составлению математических моделей для решения оптимизационных задач, однако такие методы требуют данных о техническом состоянии объекта, стоимостных характеристиках и др., что не всегда может быть доступно, поэтому присутствует необходимость в разработке метода без использования такой информации. **Результаты.** Предложен метод определения количества запасных экземпляров выходящих из строя объектов с использованием данных о наработках эксплуатируемых однотипных объектов и определения прогнозных вероятностей отказов, позволяющий при отсутствии статистических данных о техническом состоянии объектов свести к минимуму простой оборудования в ожидании запасных частей.

**Abstract. Aim.** The paper aims to reduce the costs associated with the post-failure downtime of equipment. This is especially relevant for industries such as oil production due to the territorial distribution of the maintained facilities and remote location of spare part storage, which leads to increased time to repair due to the wait for the arrival of the right part or piece of equipment. At the same time, there may be spare parts in stock that will not prove to be useful in the near future due to the irrational content of the stock in storage. **Methods.** Managing equipment spare parts usually comes down to using probabilistic methods and mathematical models for solving optimization problems, but such methods require data on the technical condition of a facility, cost characteristics, etc., that may not always be available, so a method that does not use such information needs to be developed. **Results.** A method is proposed for defining the number of spare items using the times-to-failure of same-type items and identifying the predicted probabilities of failures, which allows, in the absence of statistical data on the technical condition of items, minimising the downtime of equipment while waiting for spare parts.

**Ключевые слова:** ремонт оборудования, эксплуатационные расходы, износ оборудования, запасные части, вероятность отказа.

**Keywords:** equipment repair, operating costs, equipment wear, spare parts, probability of failure.

**Для цитирования:** Лейзгольд К.А., Бочкарев С.В. Определение необходимого количества запасных частей в условиях ограниченного объема данных // Надежность. 2024. №4. С. 20-28. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-20-28>

**For citation:** Leyzgold K.A., Bochkarev S.V. Defining the required number of spare parts under data constraints. Dependability 2024;4:20-28. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-20-28>

**Поступила:** 09.01.2024 / **После доработки:** 29.05.2024 / **К печати:** 18.11.2024

**Received on:** 09.01.2024 / **Revised on:** 29.05.2024 / **For printing:** 18.11.2024

## Введение

Согласно распоряжению [1], в рамках реализации межотраслевого проекта «Производство будущего», входящего в проекты стратегического направления, доля предприятий, использующих технологии предсказательной (предиктивной) аналитики при прогнозировании и проведении послепродажного (сервисного) обслуживания промышленной продукции, к 2030 году должна составлять не менее 75%, а доля предприятий, использующих технологии промышленного интернета вещей, сбора данных и диспетчерского контроля для управления производственными процессами в реальном времени – не менее 95%. Однако на данный момент на предприятиях наблюдается высокая степень износа основных фондов, что ведет к низкой эффективности производственных мощностей, высокой доле брака производства продукции, высоким производственным издержкам и другим негативным последствиям. Проблему усугубляет еще и отсутствие импортозамещающей продукции, а также низкая доля предприятий, использующих ERP и SCM-системы – 21,9% и 14,3% соответственно [2].

Описанная выше проблематика распространяется на все отрасли производственной деятельности, в том числе на предприятия нефтедобычи, на которых используется множество типов оборудования. Актуальность задач заключается в определении соответствующих графиков техобслуживания и прогнозировании отказов этого оборудования. Остановка работы скважины связана с огромными расходами и приводит к простоя дорогостоящего оборудования, который вызывает перерыв в работе персонала в ожидании замены или ремонта отказавшего оборудования. В случае работы на шельфе расходы при отказах оборудования и сложность доставки заменяющего оборудования еще больше увеличиваются.

Существующие системы обслуживания скважин характеризуются наличием на месте работы избыточного и дополнительного оборудования. Избыточное оборудование повышает стоимость добычи нефти, увеличивает общие затраты, необходимые для поддержания требуемого уровня работоспособности, такие системы не могут служить оптимальным решением в случае нехватки площади, например, при работе на шельфе или в областях с уязвимой природной средой.

В настоящее время системы обслуживания позволяют обнаруживать аномальное состояние отдельной единицы оборудования и/или прогнозировать время возникновения такого отклонения от нормы в данной единице оборудования. Для этого необходимо использование специфического для данного процесса графика техобслуживания, который не предусматривает адаптацию к каждой отдельной единице оборудования, например, учета того, как стареет данное оборудование или его реакции на изменение рабочих циклов из-за использования для различных типов работ или наличие большого

числа датчиков, отслеживающих состояние оборудования. Кроме того, обнаружение аномального состояния отдельной единицы оборудования иногда заключается просто в установлении наличия или отсутствия данной единицы оборудования. Однако такое обнаружение не позволяет осуществлять учет взаимодействия между единицами оборудования и формирование картины, отражающей бесперебойное функционирование производственного процесса в целом. Поэтому необходима разработка и проведение мероприятий, позволяющих сократить время простоя оборудования, зависящее не только от времени проведения ремонта, но и от наличия запасных частей.

## 1. Управление объемом заказа запасных частей

Оптимизация стратегий профилактического обслуживания и заказа запасных частей для современного производственного оборудования является чрезвычайно важной задачей, поскольку она существенно влияет на надежность работы оборудования. Кроме того, управление запасными частями может составлять значительную часть эксплуатационных расходов предприятия, поэтому проблема оптимизации запасов оказывает непосредственное влияние на снижение эксплуатационных расходов, что делает ее значимым направлением исследований [3–6].

Управление запасными частями сводится, как правило, к решению двух задач:

- 1) управление логистикой или цепочками поставок запасных частей;
- 2) оптимизация складских запасов.

Решение первой задачи сводится к сокращению времени ожидания, при этом отмечается, что главной проблемой является неопределенность в отношении качества, сроков и объема запасных частей и необходимо создание такого управления, чтобы свести к минимуму негативное влияние задержек и сбоя поставок на производство [6].

Вторая задача затрагивает широкий профиль проблем в управлении запасами запчастей. Здесь следует отметить сложность в точной оценке спроса на запчасти и в определении оптимального количества запчастей, хранящихся на складе [7, 8], кроме того, учитывается и влияние экономической составляющей хранения запасных частей [9].

Перечисленные выше особенности требуют создания автоматизированной системы, позволяющей с наибольшей эффективностью и скоростью проводить технические обслуживания и ремонты, тем самым снижая финансовые затраты и потери от простоя производства.

Исследования в области управления запасами запасных частей в основном сводятся к вероятностным методам и составлению математических моделей для решения оптимизационных задач, при этом в

большинстве случаев решаются задачи минимизации затрат по различным критериям [3, 6, 7, 9, 10, 11, 12]. Например, авторы [6] представляют целевую функцию в общем виде

$$TC = TC_1 + TC_2 + TC_3 + TC_4 \rightarrow \min,$$

где  $TC$  – общая стоимость,  $TC_1$  – стоимость установки,  $TC_2$  – общая стоимость хранения,  $TC_3$  – общая стоимость обратного заказа,  $TC_4$  – общая стоимость потерянных продаж.

Аналогичным образом рассматривается целевая функция в работах [9, 12]. При этом приведенные стоимости представляют собой сложные зависимости и учитывают влияние большого перечня параметров – размер партии заказа запасных частей, размер партии заказа на восстановление запасных частей в цикле, время цикла заказа запасных частей производителем, период восстановления запасных частей во время сбоя в цикле, стоимость хранения единицы запасных частей, коэффициент сбора запасных частей, коэффициент спроса на запасные части, размера производственного участка в исходном графике, периода отказа, стоимости обратного заказа на единицу продукции в единицу времени, стоимости наладки повторного производства, восстановления для партии повторного производства в цикле, периода восстановления в цикле восстановления, количества циклов восстановления и др.

С другой стороны, в целевой функции могут учитываться также и временные характеристики. В [13] при минимизации затрат учитывается стоимость единицы времени простоя объекта, среднее время амортизации запасного объекта, в [10] оптимизируются затраты в единицу времени, в [3, 14] – время заказа и период пополнения склада.

Также решаются задачи по определению оптимального размера партии запасных частей и по предельному запасу [14, 15]:

$$S_1 = \sqrt{\frac{2\mu g}{S}},$$

$$q^* = \sqrt{2C_0 D},$$

где  $S_1$  – оптимальный предельный запас, когда дефицит запчастей не допускается;  $\mu$  – постоянство интенсивности спроса запчастей в единицу времени;  $g$  – фиксированные издержки;  $S$  – переменный запас;  $q^*$  – размер партии запасных частей;  $C_0$  – суммарные затраты;  $D$  – параметр модели.

В работе [16] описан подход с точки зрения минимизации риска принятия неверного решения, учитывающего стоимость плановых и неплановых заказов, стоимость хранения и обслуживания детали на складе, стоимость нахождения машины в неработоспособном состоянии.

Применение вероятностных методов для управления запасными частями может сводиться к нахождению вероятностей возникновения дефицита деталей [17], вероятности спроса в случае отказа [8, 18], вероятности состояний оборудования [13], вероятности отказов [15, 19], либо к нахождению рисков [5]. В таких исследованиях все решения принимаются на основе количественной оценки вероятности событий, однако точность принятых решений напрямую зависит от количества накопленной статистической информации, кроме того, вероятностные модели представляют собой еще более сложные математические зависимости.

Приведенные выше способы управления запасными частями основываются на достаточно сложных математических подходах и требуют наличия большого объема информации в качестве исходных данных, поэтому возникает необходимость в разработке подхода, не требующего сложных вычислительных мощностей, учитывающего неопределенность информации и позволяющего снизить простои производственных мощностей из-за отсутствия запасного комплекта оборудования. Такой подход описан в [20].

## 2. Определение необходимых запасных единиц оборудования

Целью применения предложенного подхода является сокращение времени простоя при ремонте оборудования, и, как следствие, сокращение ущербов от простоя, выражающихся в недоборах нефти, невыпусках продукции и т.п. Подход заключается в определении точечных оценок вероятностей отказа, оценочных значений наработки на начало и конец периода заказа оборудования, прогнозной функции распределения наработки до отказа объектов и на ее основе определения количества необходимых к закупке запасных единиц оборудования. При применении такого способа важно не оптимальное определение количества запасных объектов, а сведение к минимуму простоя оборудования. Стоит отметить, что такое определение необходимого количества запасных единиц оборудования учитывает только невозстанавливаемые объекты, которые при выходе из строя будут заменяться на новые.

Рассмотрим совокупность однотипных невозстанавливаемых объектов. Для таких объектов при наличии данных наблюдений об отказах (данные эксплуатации, обратной связи) для  $n$  невозстанавливаемых объектов из однородной совокупности точечная оценка вероятности безотказной работы  $\hat{R}(t_i)$  согласно [21] определится как отношение количества объектов  $n_s(t)$ , функционирующих в момент времени  $t_i$ , к общему числу объектов  $n$ :

$$\hat{R}(t_i) = \frac{n_s(t_i)}{n},$$

где  $n_s(t_i)$  – количество невозстанавливаемых объектов, которые функционируют в момент времени  $t_i$ ,  $n$  – общее количество элементов в однотипной совокупности.

Тогда точечная оценка вероятности отказа  $\hat{F}(t_i)$  в момент времени  $t_i$  определится

$$\hat{F}(t_i) = 1 - \hat{R}(t_i) = 1 - \frac{n_s(t_i)}{n}.$$

Общее количество элементов в однотипной совокупности будет являться суммой количества отказавших к моменту времени  $t_i$  объектов  $n_{отк}(t_i)$  и количества функционирующих в момент времени  $t_i$  объектов  $n_s(t_i)$ :

$$n = n_{отк}(t_i) + n_s(t_i).$$

Тогда точечная оценка вероятности отказа для одного объекта в момент времени  $t_i$  будет равна

$$\hat{F}_i(t_i) = \frac{n_{отк}(t_i)}{n_{отк}(t_i) + n_s(t_i)}. \quad (1)$$

Исходя из точечных оценок вероятностей отказов, вычисленных для каждого объекта, выбирается вид функции распределения, для которой будут определяться оценки параметров распределения и рассчитываться прогнозное значение функции распределения наработки до отказа каждого объекта. Наиболее применяемыми функциями при определении отказов являются нормальное распределение, логарифмически нормальное распределение, экспоненциальное распределение и распределение Вейбулла [22]. В зависимости от выбранного вида функции оценки параметров распределения будут варьироваться.

Если за рассматриваемый период происходит только один отказ, то оценки параметров находятся один раз в этот момент отказа и остаются неизменными, однако при каждом последующем отказе необходимо заново рассчитать точечные оценки вероятности отказов объектов и уточнить (заново определить) значения оценок параметров распределения. Учитывая, что при каждом новом отказе будет произведен перерасчет оценок параметров распределения, значения или прогнозной функции распределения также необходимо будет пересчитать. В частности, для логнормального распределения прогнозная функция распределения  $F(t)$  наработки  $t$  до отказа запишется в виде

$$F(t) = \int_{T_1}^{T_2} f(t, \mu, \sigma) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt, \quad (2)$$

где  $\mu$ ,  $\sigma$  – оценки параметров распределения при логнормальном распределении,  $t$  – время работы оборудования.

За времена  $T_1$  и  $T_2$  в формуле (2) предлагается принимать оценочные значения наработок на начало  $T_{ij}^{нач}$  и конец  $T_{ij}^{кон}$  текущего периода заказа запасных единиц объектов для каждого объекта. Текущий период заказа обозначается порядковым номером  $j$ , где в качестве

первого периода брать дату введения совокупности однотипных объектов в эксплуатацию. Конец периода зависит от числа дней  $r$  между регламентными заказами объектов. В качестве  $r$  может быть заявлен любой предполагаемый срок, который предприятие использует для формирования заказа на запасные объекты, и этот срок может варьироваться по требованиям предприятия. Оценочные значения наработок на начало  $T_{ij}^{нач}$  и конец  $T_{ij}^{кон}$  текущего периода заказа отражают предполагаемую наработку в часах или днях каждого работающего объекта совокупности при отказе одного из них. На текущий момент времени  $t$ , в который происходит отказ одного из объектов совокупности, оценочные значения наработок на начало  $T_{ij}^{нач}$  и конец  $T_{ij}^{кон}$  определяются:

$$T_{ij}^{нач} = \frac{t_i}{T_k} \cdot r \cdot (j-1); \quad (3)$$

$$T_{ij}^{кон} = \frac{t_i}{T_k} \cdot r \cdot j, \quad (4)$$

где  $t_i$  – наработка  $i$ -м техническим объектом на текущий момент события отказа, сут.;  $T_k$  – число дней эксплуатации отказавшего  $k$ -го технического объекта;  $r$  – число дней между регламентными заказами объектов;  $j$  – номер периода поставки запасных единиц объектов.

Полученные значения  $T_{ij}^{нач}$  и  $T_{ij}^{кон}$  необходимы для определения прогнозных значений функции распределения наработки до отказа  $F_{ij}(t_i)$  в конце текущего периода поставки по формуле (2):

$$F_{ij}(t_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{T_{ij}^{нач}}^{T_{ij}^{кон}} \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt. \quad (5)$$

Значение функции распределения наработки до отказа объекта говорит о вероятности выхода из строя этого объекта, при этом каждое значение вероятности говорит о выходе из строя только одного объекта, то есть в худшем случае для каждого объекта совокупности эта вероятность может быть равна единице, тогда в регламентный заказ придется заказать ровно столько объектов, сколько было введено в эксплуатацию изначально. В общем случае вероятности выхода из строя объекта могут принимать значения от 0 до 1 включительно, поэтому объем заказа партии запасных объектов можно определить через сумму этих вероятностей, так как в таком случае будут учтены объекты как с большой вероятностью отказа, так и с малой. Учитывая вышеизложенное объем заказа партии запасных объектов определится следующим образом

$$N_j = \sum_{i=1}^n F_{ij}(t_i), \quad (6)$$

где  $N_j$  – объем заказа запасных единиц оборудования;  $n$  – количество эксплуатируемых однотипных единиц оборудования,  $j$  – номер периода заказа.

Табл. 1. Статистика остановки скважин за 2010-2015 гг.

| Скважина | Первый запуск       |                         |                  | Второй запуск       |                         |                  | Третий запуск       |                         |                  |
|----------|---------------------|-------------------------|------------------|---------------------|-------------------------|------------------|---------------------|-------------------------|------------------|
|          | Дата пуска скважины | Дата остановки скважины | Наработка, суток | Дата пуска скважины | Дата остановки скважины | Наработка, суток | Дата пуска скважины | Дата остановки скважины | Наработка, суток |
| 259      | 28.08.10            | 28.12.10                | 122              | 24.11.11            | 30.11.11                | 6                | 27.06.13            | 28.11.15                | 884              |
| 295      | 20.02.10            | 11.04.11                | 415              | 21.05.11            | 08.07.13                | 779              | 15.07.13            | 31.07.15                | 746              |
| 317      | 08.10.10            | 27.06.11                | 262              | 30.07.11            | 08.09.11                | 40               | 18.07.12            | 25.09.12                | 69               |
| 118      | 09.01.10            | 16.10.11                | 645              |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 93       | 08.05.10            | 31.10.11                | 541              | 04.11.11            | 07.11.11                | 3                | 16.01.12            | 09.07.12                | 175              |
| 261      | 18.12.10            | 11.11.11                | 328              | 25.05.14            | 27.05.14                | 2                | 27.03.15            | 03.10.15                | 190              |
| 241      | 10.05.10            | 28.12.11                | 597              |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 279      | 07.04.10            | 14.01.12                | 647              | 19.01.12            | 27.03.13                | 433              |                     |                         |                  |
| 98       | 13.05.10            | 12.02.12                | 640              |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 414      | 26.04.10            | 29.06.12                | 795              |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 601      | 16.07.10            | 03.07.12                | 718              |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 225      | 30.05.10            | 06.07.12                | 768              | 08.07.12            | 26.09.14                | 810              |                     |                         |                  |
| 572      | 17.01.10            | 12.07.12                | 907              | 27.10.12            | 19.12.12                | 53               |                     |                         |                  |
| 537      | 29.03.10            | 26.07.12                | 850              |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 221      | 15.11.10            | 02.12.12                | 748              |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 599      | 18.08.10            | 21.12.12                | 856              | 21.06.13            | 13.11.19                | 2336             |                     |                         |                  |
| 356      | 16.03.10            | 04.06.14                | 1541             |                     |                         |                  |                     |                         |                  |
| 646      | 12.02.10            | 13.02.15                | 1827             |                     |                         |                  |                     |                         |                  |

Полученная величина может иметь дробное значение, поэтому для формирования объема поставки партии запасных объектов ее необходимо округлить в сторону ближайшего большего целого.

Применение предложенного подхода проиллюстрировано расчетами количества необходимых единиц

погружных электродвигателей для одного из месторождений нефти в Пермском крае. Двигатели мощностью 32 кВт рассчитаны на напряжение 1000 В и используются на нефтяных скважинах, оборудованных установками электроцентробежных насосов. Для этого использовалась выборка данных за 2010–2015 гг. по вы-

Табл. 2. Расчет количества необходимых запасных двигателей в первый период поставки

| Скважина | Наработка $t_i$ , сут. | Точечные оценки функции распределения наработки до отказа для каждого объекта, $\hat{F}_i(t_i)$ | Оценочное значение наработки на конец текущего периода заказа $T_i^{кон}$ , сут. | Прогнозная функция распределения наработки до отказа каждой единицы оборудования на текущий период заказа, $F_{ij}$ |
|----------|------------------------|---|--|---|
| 1        | 2                      | 3   | 4  | 5   |
| 261      | 10                     | 0,0000  | 29,92  | $2,04 \cdot 10^{-13}$   |
| 221      | 43                     | 0,0000  | 128,65   | 0,0009  |
| 317      | 81                     | 0,0000  | 242,34   | 0,0895  |
| 259      | 122                    | 0,0667  | 365,00   | 0,4259  |
| 599      | 132                    | 0,0667  | 394,92   | 0,5143  |
| 601      | 165                    | 0,0714  | 493,65   | 0,7473  |
| 225      | 212                    | 0,0769  | 634,26   | 0,9153  |
| 98       | 229                    | 0,0833  | 685,12   | 0,9443  |
| 241      | 232                    | 0,0909  | 694,10   | 0,9483  |
| 93       | 234                    | 0,1000  | 700,08   | 0,9508  |
| 414      | 246                    | 0,1111  | 735,98   | 0,9636  |
| 279      | 265                    | 0,1250  | 792,83   | 0,9775  |
| 537      | 274                    | 0,1429  | 819,75   | 0,9821  |
| 356      | 287                    | 0,1667  | 858,65   | 0,9871  |
| 295      | 311                    | 0,2000  | 930,45   | 0,9930  |
| 646      | 319                    | 0,2500  | 954,39   | 0,9943  |
| 572      | 345                    | 0,3333  | 1032,17  | 0,9970  |
| 118      | 353                    | 0,5000  | 1056,11  | 0,9976  |

ходам из строя двигателей такого типа на 18 скважинах. В данной выборке на конец 2010 года все двигатели уже были введены в работу (табл. 1).

За указанный период некоторые из скважин были остановлены несколько раз, что отмечено в табл. 1 (первый, второй, третий запуски). Этот факт учитывался в расчетах замены даты ввода в эксплуатацию и пересчетом количества дней наработки.

За период заказа запасных единиц принимался один год ( $r = 365$  суток) и для удобства расчетов принято, что заказ осуществляется в конце года. Следует отметить, что предлагаемый подход не ограничивает выбор дней периода между заказами и даты заказов запасных частей.

В отличие от предложенной в [20] методики, где предполагается одновременный ввод однотипных объектов в эксплуатацию, что в действительности маловероятно, предлагается учесть различные сроки ввода оборудования в эксплуатацию. Кроме того, часто происходят расширения или сокращения производственных мощностей, а, следовательно, и количество однотипных объектов будет всегда варьироваться во времени. Учесть такие изменения возможно расширением или сокращением выборки объектов.

Ввод объектов в эксплуатацию производился в течение всего 2010 года, поэтому первой датой поставки запасных двигателей будет считаться конец 2010 года, соответственно весь 2010 год будет являться первым периодом заказа ( $j = 1$ ). Учитывая, что первый отказ двигателя из выборки произошел 28 декабря 2010 г., произведем расчет количества запасных двигателей на эту дату при выходе из строя двигателя на скважине 259.

Используя данные табл. 1, по формулам (1), (3) и (4) определим значения наработок каждого двигателя из выборки к дате выхода из строя двигателя на скважине 259, точечные оценки функции распределения наработки до отказа для каждого объекта  $\hat{F}_i(t_i)$  в эту дату, оценочные значения наработок на начало  $T_{ij}^{нач}$  и конец  $T_{ij}^{кон}$  первого периода заказа и сведем в табл. 2. Порядок скважин в табл. 2 выстроен по возрастанию дней наработки двигателей на скважинах к дате отказа двигателя на скважине 259.

Согласно табл. 1, наработка на отказ для двигателя скважины 259 составила 122 суток, для остальных скважин значения наработок  $t_i$  вычислялись как разница в сутках между днем введения в эксплуатацию и днем выхода из строя двигателя скважины 259. Оценочное значение наработки на начало текущего периода приравнивается к нулю для первого периода поставки запасных экземпляров ( $j = 1, T_{ij}^{нач} = 0$ ). Для поиска оценок параметров распределения было выбрано логарифмически нормальное распределение. Оценки параметров распределения были найдены с помощью оператора нахождения решений *Minerr* ПО *MathCad*. Такой метод позволяет найти приближенные решения системы уравнений, приводящие к минимальной ошибке, и позволяет говорить об эффективности найденных оценок

параметров распределения, так как оценки параметров в данном случае имеют наименьшую возможную дисперсию [23]. Оценки параметров распределения получились равными  $\mu = 5,966, \sigma = 0,354$ . С учетом найденных оценок параметров распределения прогнозная функция распределения наработки до отказа каждой единицы оборудования на текущий период заказа согласно формуле (5) будет иметь вид

$$F_{ij}(t_i) = \frac{1}{0,354 \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^{T_{ij}^{кон}} \frac{1}{t} \exp \left[ -\frac{(\ln t - 5,966)^2}{2 \cdot 0,354^2} \right] dt.$$

Расчитанные для каждого двигателя значения прогнозных функций распределения наработки до отказа занесены в столбец 5 (см. табл. 2). Складывая все полученные значения согласно (6) и округляя результат в большую сторону до целого, получаем необходимое количество запасных единиц оборудования на конец первого периода –  $N_1 = 14$  штук.

Аналогичным образом было рассчитано количество запасных частей на конец второго  $N_2$  и третьего  $N_3$  периода поставки: для конца второго периода количество необходимых к закупке двигателей составило  $N_2 = 10$  единиц, на конец третьего –  $N_3 = 5$ .

Стоит отметить, что согласно данным табл. 1, за второй период эксплуатации (за 2011 г.) вышло из строя 9 единиц (двигатели на скважинах 317, 93 – дважды, на скважинах 259, 295, 118, 261, 241 – один раз). При заказанных  $N_1 = 14$  осталось  $N_{ост1} = 14 - 9 = 5$  двигателей неиспользованными. В третьем периоде (за 2012 г.) вышло из строя 12 двигателей (на скважинах 279, 98, 414, 601, 225, 537, 221, 599, 317, 93 – один раз, на скважине 572 – дважды). Расчет показал необходимость в заказе  $N_2 = 10$  единиц, однако с учетом оставшихся 5 единиц из первого заказа количество запасных единиц оказалось достаточным, три двигателя осталось в запасе на следующий год  $N_{ост2} = 5 + 10 - 12 = 3$ . Учитывая, что скважины переводили на другие параметры добычи, и, как следствие, происходила смена типоразмера двигателей и насосов и такие двигатели уже не могли учитываться в общем расчете однотипных единиц оборудования, для последующих периодов заказа партий запасных двигателей (2013–2015 гг.) расчетное количество запасных единиц и выходов из строя заметно снизилось.

## Заключение

В работе были проанализированы методы управления объемом заказа запасных частей. Анализ показал, что зачастую для наиболее точной оценки необходимого количества запасных частей требуется большой объем статистических данных о работе оборудования и сложный математический аппарат для их обработки, поэтому был предложен подход, не требующий большого объема информации и сложной обработки данных. Однако применение предлагаемой методики возможно

только для групп однотипных объектов, которые могут быть взаимозаменяемы. Для определения количества запасных частей собираются данные о наработках однотипных объектов. По количеству дней наработок для каждого объекта определяется точечная оценка вероятности отказа, оценочные значения наработки на начало и конец текущего периода заказа для каждого объекта. Определены оценки параметров прогнозной функции распределения и рассчитаны значения этой функции для каждой единицы оборудования с учетом оценочных значений наработки на начало и конец текущего периода заказа, что позволило в итоге определить количество единиц оборудования, необходимых к заказу в следующую поставку оборудования. Предлагаемая методика может использоваться как самостоятельный инструмент планирования закупок запасных частей и оборудования или в качестве первой ступени в системах предиктивной аналитики по управлению техническим обслуживанием и ремонтом оборудования.

## Библиографический список

1. Распоряжение Правительства РФ от 7 ноября 2023 года №3113-р Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/OwFdjc3nMWk3BqAUbjqdJI mPl3NxqRIS.pdf> (дата обращения: 18.09.2023).
2. Федеральная служба государственной статистики. Официальная статистика. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/science> (дата обращения: 18.09.2023).
3. He Y., Gao Z. Joint Optimization of Preventive Maintenance and Spare Parts Ordering Considering Imperfect Detection // *Systems* 2023, 11, 445. DOI: 10.3390/systems11090445
4. Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review // *Sustainability* 2021, 13, 2460. DOI: 10.3390/su13052460
5. Durán O., Afonso P., Jiménez V. et al. Cost of Ownership of Spare Parts under Uncertainty: Integrating Reliability and Costs // *Mathematics* 2023, 11, 3316. DOI: 10.3390/math11153316
6. Mat Ropi N., Hishamuddin H., Wahab D.A. et al. Optimal Lot-Sizing Decisions for a Remanufacturing Production System under Spare Parts Supply Disruption // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. P. 4053. DOI: 10.3390/math11194053
7. Pacheco-Velázquez E.A., Robles-Cárdenas M., Juárez Ordóñez S. et al. A Heuristic Model for Spare Parts Stocking Based on Markov Chains // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. P. 3550. DOI: 10.3390/math11163550
8. Makarova I., Buyvol P., Gabsalikhova L. et al. Decision Making under Conditions of Uncertainty and Risk in the Formation of Warehouse Stock of an Automotive Service Enterprise // *Algorithms*. 2023. Vol. 16. P. 388. DOI: 10.3390/a16080388
9. Barriere C., Alberto M. Determining Inventory Base Stock Levels of Expendable Spare Parts Under Service Level Agreement for On-Time Delivery [Электронный ресурс] URL: <http://hdl.handle.net/11244/45153> (дата обращения: 10.10.2023).
10. Саливоник А.В. Методика расчета оптимальной поставки многономенклатурного комплекта запасных частей // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2006. № 14. С. 46-49.
11. Паньковский Б.Е. Адаптированная методика многокритеральной оптимизации для комплектов запасных частей и инструментов // *Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского*, Москва, 18–28 февраля 2019 года. М.: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2019. С. 85-86.
12. Guo Y., Shi Q., Guo C. Multi-Period Spare Parts Supply Chain Network Optimization under (T, s, S) Inventory Control Policy with Improved Dynamic Particle Swarm Optimization // *Electronics*. 2022. Vol. 11. P. 3454. DOI: 10.3390/electronics11213454
13. Херсонский Н.С., Большедворская Л.Г. Определение необходимого количества запасных частей для поддержания работоспособности приборов // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2023. № 3. С. 6-21. DOI: 10.51955/2312-1327\_2023\_3\_6
14. Керимов М.А. Вероятностная модель управления запасами запасных частей на предприятиях АПК // *Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXI Международной научно-практической конференции: в 2-х томах*, Санкт-Петербург, 29–30 июня 2017 года. Vol. 2. С-Пб: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2017. С. 346-352.
15. Булатов С.В. Повышение эффективности управления запасными частями на автотранспортном предприятии при наличии страхового запаса // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021. № 9(106). С. 43-48. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-43-48
16. Оптимизация заказа запасных частей на автотранспортных предприятиях / И.Ф. Воронина, Ф.М. Судак, В.С. Перов [и др.] // *Вести Автомобильно-дорожного института*. 2021. № 1(36). С. 50-55.
17. Зарницин В.П., Чернышев В.Л. Определение показателей достаточности запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) комплексов вооружения // *Известия ТРТУ*. 2004. № 8(43). С. 307-309.
18. Patriarca R., Hu T., Costantino F. et al. A System-Approach for Recoverable Spare Parts Management Using the Discrete Weibull Distribution // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 5180. DOI: 10.3390/su11195180

19. Чепурко В.А., Черняев А.Н. Методика оценки объема ЗИП с неснижаемым уровнем // *Надежность*. 2021. Т. 21. № 3. С. 13-19. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-3-13-19

20. Патент № 2782634 С1 Российская Федерация, МПК G01M 15/00. Способ определения количества выходящих из строя объектов с использованием данных о наработках эксплуатируемых технических объектов: № 2021133800: заявл. 19.11.2021; опубл. 31.10.2022 / А. Б. Петроченков, С. В. Бочкарев, М. В. Овсянников [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

21. ГОСТ Р 27.010-2019 Надежность в технике. Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтпригодности. М.: Стандартинформ, 2019. 80 с.

22. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика: Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

23. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. 8-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2002. 479 с.

## References

1. Decree of the Government of the Russian Federation dated November 7, 2023 No. 3113-r. Strategic direction of the digital transformation of processing industries within the responsibility of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. (accessed 09.18.2023). Available at: <http://static.government.ru/media/files/OwFdjc3nMWk3BqAUbjqdJImPl3NqxqRIS.pdf>. (in Russ.)

2. Federal State Statistics Service. Official statistics. (accessed 09.18.2023). Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>. (in Russ.)

3. He Y., Gao Z. Joint Optimization of Preventive Maintenance and Spare Parts Ordering Considering Imperfect Detection. *Systems* 2023;11:445. DOI: 10.3390/systems11090445.

4. Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review. *Sustainability* 2021;13:2460. DOI: 10.3390/su13052460.

5. Durán O., Afonso P., Jiménez V. et al. Cost of Ownership of Spare Parts under Uncertainty: Integrating Reliability and Costs. *Mathematics* 2023;11:3316. DOI: 10.3390/math11153316.

6. Mat Ropi N., Hishamuddin H., Wahab D.A. et al. Optimal Lot-Sizing Decisions for a Remanufacturing Production System under Spare Parts Supply Disruption. *Mathematics* 2023;11:4053. DOI: 10.3390/math11194053.

7. Pacheco-Velázquez E.A., Robles-Cárdenas M., Juárez Ordóñez S. et al. A Heuristic Model for Spare Parts Stocking Based on Markov Chains. *Mathematics* 2023;11:3550. DOI: 10.3390/math11163550.

8. Makarova I., Buyvol P., Gabsalikhova L. et al. Decision Making under Conditions of Uncertainty and Risk in the Formation of Warehouse Stock of an Automotive Service Enterprise. *Algorithms* 2023;16:388. DOI: 10.3390/a16080388.

9. Barriere C., Alberto M. Determining Inventory Base Stock Levels of Expendable Spare Parts Under Service Level Agreement for On-Time Delivery. (accessed 10.10.2023). Available at: <http://hdl.handle.net/11244/45153>.

10. Salivonik A.V. [The methodology for calculating the optimal supply of a multiproduct set of spare parts]. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa* 2006;14:46-49. (in Russ.)

11. Pankovsky B.E. [Adapted multicriterial optimisation technique for sets of spare parts and tools]. In: Proceedings of the E.V. Armensky Interuniversity Science and Engineering Conference of Students, Postgraduates, and Young Specialists; Moscow; February 18-28, 2019. Moscow: HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; 2019. P. 85-86. (in Russ.)

12. Guo Y., Shi Q., Guo C. Multi-Period Spare Parts Supply Chain Network Optimization under (T, s, S) Inventory Control Policy with Improved Dynamic Particle Swarm Optimization. *Electronics* 2022;11:3454. DOI: 10.3390/electronics11213454.

13. Khersonsky N.S., Bolshedvorskaya L.G. Determination of the necessary quantity of spare parts to maintain the performance of devices. *Crede Experto: transport, society, education, language* 2023;3:6-21. DOI: 10.51955/2312-1327\_2023\_3\_6. (in Russ.)

14. Kerimov M.A. [A probabilistic model of spare parts inventory management at agricultural enterprises]. In: [Systems analysis in design and management: proceedings the XXI International Science and Practice Conference: in 2 volumes]; St. Petersburg; June 29-30, 2017. Vol. 2. Saint Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2017. P. 346-352. (in Russ.)

15. Bulatov S.V. Improvement of the efficiency of duplicates at a motor transport enterprise if an insurance reserve is available. *Bulletin of Bryansk State Technical University* 2021;9(106):43-48. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-43-48. (in Russ.)

16. Voronina I.F., Sudak F.M., Chubuchnyi S.A., Perov V.S. et al. Improvement of the Prediction Technique for the Car Service Market. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute* 2021;1(36):50-55. (in Russ.)

17. Zarnitsin V.P., Chernyshev V.L. [Defining the sufficiency indicators of spare parts, tools, and accessories of weapons systems]. *Izvestia TRTU* 2004;8(43):307-309. (in Russ.)

18. Patriarca R., Hu T., Costantino F. et al. A System-Approach for Recoverable Spare Parts Management Using the Discrete Weibull Distribution. *Sustainability* 2019;11:5180. DOI: 10.3390/su11195180.

19. Chepurko V.A., Chernyaev A.N. Method of estimating the size of an SPTA with a safety stock. *Dependability* 2021;21(3):13-19. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-13-19>.

20. Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V., Ovsyannikov M.V. et al. Patent No. 2782634 C1 Russian Federation, IPC G01M 15/00. [A method for determining the number of failing items using data on the times-to-failure of technological facilities in operation]: No. 2021133800: application 19.11.2021: publ. 31.10.2022; the applicant is the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Perm National Research Polytechnic University.

21. GOST R 27.010-2019. Dependability in technics. Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability measures; 2019. (in Russ.)

22. Kobzar A.I. [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. Moscow: FIZMATLIT; 2006. (in Russ.)

23. Gmurman V.E. [Probability theory and mathematical statistics: Textbook for higher educational institutions. 8-th edition]. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. (in Russ.)

### Сведения об авторах

**Лейзгольд Карина Анатольевна** – старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, ул. Профессора Поздеева, д.7, г. Пермь, Российская Федерация, 614013, e-mail: leizgold\_ka@pstu.ru.

**Бочкарев Сергей Васильевич** – доктор технических наук, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации электротехнического факультета Пермского национального исследовательского поли-

технического университета, ул. Профессора Поздеева, д.7, г. Пермь, Российская Федерация, 614013, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru.

### About the authors

**Karina A. Leyzgold**, Senior Lecturer, Department of Microprocessor Means of Automation, Perm National Research Polytechnic University, 7 Professora Pozdeeva Street, Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: leizgold\_ka@pstu.ru.

**Sergey V. Bochkarev**, Doctor of Engineering, Professor, Department of Microprocessor Means of Automation, Perm National Research Polytechnic University, 7 Professora Pozdeeva Street, Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru.

### Вклад авторов в статью

**Лейзгольд К.А.** – выполнила анализ и обзор публикаций по теме исследования, разработала методику определения количества необходимых запасных частей в условиях ограниченного объема данных, провела математическую обработку данных.

**Бочкарев С.В.** – выполнил постановку задачи исследования, разработал методику определения количества необходимых запасных частей в условиях ограниченного объема данных.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

# Оценка, сравнение и ранжирование показателей оперативной надежности воздушных ЛЭП электроэнергетических систем

## Evaluating, comparing, and ranking operational reliability indicators of overhead transmission lines of electric power systems

Фархадзаде Э.М.<sup>1</sup>, Мурадалиев А.З.<sup>1\*</sup>, Абдуллаева С.А.<sup>1</sup>  
Farhadzadeh E.M.<sup>1</sup>, Muradalyiev A.Z.<sup>1\*</sup>, Abdullayeva S.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики

<sup>1</sup>Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Institute of Energetic

\*elmeht@rambler.ru



Фархадзаде Э.М.



Мурадалиев А.З.



Абдуллаева С.А.

**Резюме.** Систематическое увеличение относительного числа единиц оборудования, устройств и установок (далее – объектов) электроэнергетических систем, срок службы которых превышает нормативное значение, и связанные с этим фактом последствия, в том числе, недопустимые, требуют принятия решительных мер по повышению эффективности их работы. Основные усилия сегодня направлены на совершенствования методов распознавания и контроля их технического состояния. Иначе говоря, совершенно обоснованно на первый план выдвигаются проблемы повышения надежности работы и безопасности обслуживания. Контроль технического состояния воздушных ЛЭП с номинальным напряжением 110 кВ и выше предлагается проводить ежемесячно на основе показателей оперативной надежности. Излагаются новые методы и алгоритмы их оценки, сравнения и ранжирования. Поскольку показатели оперативной надежности многомерны, т.е. зависят от большого числа факторов, существующие методы сравнения и ранжирования одномерных статистических оценок к ним неприемлемы, так как пренебрежение предпосылками этих методов ведет к существенному росту риска ошибочного решения. Предлагаемые новые методы основаны на фидуциальном подходе, имитационном моделировании и теории проверки статистических гипотез. Громоздкость и трудоемкость ручного счета показателей оперативной надежности, наукоемкость методов расчета компенсируется переходом к автоматизированным системам, обеспечивающим информационную и методическую поддержку сведениями о техническом состоянии воздушных ЛЭП. Рекомендуемые методы входят в группу риск-ориентированных подходов повышения эффективности работы электроэнергетических систем.

**Abstract.** The systematically growing proportion of equipment, devices, and installations (hereinafter referred to as entities) of electrical power systems, whose service life exceeds the standard value, and the consequences of that fact, some of which are unacceptable, require decisive measures to improve their efficiency. Today, the effort is focused on improving the methods of identifying and monitoring their technical state. In other words, the matters associated with improving the reliability and safety of operation naturally come to the fore. The authors suggest monitoring the technical state of overhead lines with a rated voltage of 110 kV or higher monthly based on the operational reliability indicators. New methods and algorithms for their assessment, comparison, and ranking are presented. Since the operational reliability indicators are multidimensional, the existing methods for comparing and ranking unidimensional statistical estimates are unacceptable, as neglecting the premises of such methods causes a significantly higher risk of a wrong decision. The proposed new methods are based on the fiducially approach, simulation, and the theory of statistical hypothesis testing. The awkwardness and labour intensity of manual calculation of operational reliability indicators and the scientific complexity of the calculation methods are compensated by the migration to automated systems that provide procedures and information on the technical state of overhead lines. The recommended methods are part of the group of risk-based approaches to improving the efficiency of electrical power systems.

**Ключевые слова.** Оперативная надежность, воздушные ЛЭП, оценка, сравнение, ранжирование, классификация, фидуциальный подход, риск ошибочного решения

**Keywords:** operational reliability, overhead lines, assessment, comparison, ranking, classification, fiducially approach, risk of wrong decision

**Для цитирования:** Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. Оценка, сравнение и ранжирование показателей оперативной надежности воздушных ЛЭП электроэнергетических систем // Надежность. 2024. №4. С. 29-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-29-37>

**For citation:** Farhadzadeh E.M., Muradalyev A.Z., Abdullayeva S.A. Evaluating, comparing, and ranking operational reliability indicators of overhead transmission lines of electric power systems. Dependability 2024;4:29-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-29-37>

**Поступила:** 26.05.2024 / **После доработки:** 31.09.2024 / **К печати:** 18.11.2024

**Received on:** 26.05.2024 / **Revised on:** 31.09.2024 / **For printing:** 18.11.2024

## Введение

Повышение эффективности работы электросетевых предприятий (далее – ЭСП) относится к важнейшим проблемам электроэнергетических систем. Сформировано и интенсивно развивается в экономике энергетики новое научное направление «Разработка системы управления активами электросетевых компаний». Наиболее полно отражено это направление в концепции [1], где отмечается: «организация деятельности электросетевых компаний в конкурентной среде выдвигает на первый план экономические критерии при безусловном обеспечении надежности».

В [2] в то же время справедливо отмечается: «деятельность по передаче электроэнергии носит монопольный характер. Из-за этого мотивация повышения эффективности работы практически отсутствует».

И, наконец, хорошо известно, что сегодня срок службы более чем 50% объектов ЭСП превышает нормативное значение и надежды на снижение этой величины, или хотя бы неперевышение ее, нет никакой [3]. Актуальность проблемы надежности объектов, срок службы которых превышает нормативное значение наглядно подтверждается материалами международных конференций [4, 5].

Необходимо учитывать, что:

- по мнению ведущих специалистов, эффективность работы сегодня определяется не только экономичностью, но и надежностью и безопасностью [6];
- последствия аварий в ЭЭС все чаще недопустимы и нарушают энергетическую безопасность;
- социальная значимость повышения тарифов на электроэнергию обуславливает систематическую поддержку государством электроэнергетических компаний при росте их оперативных издержек;
- отсутствует возможность, да и необходимость массовой замены и модернизации объектов, срок службы которых превышает нормативное значение.

А если все это учесть, то, несмотря на мнение отдельных руководителей бизнеса, сегодня важнейшей проблемой ЭЭС является *повышение надежности и безопасности объектов, срок службы которых превышает нормативное значение*.

Методический подход авторов к решению этой проблемы основан на некоторых предположениях, позволяющих использовать подходы, принятые в иных, казалось бы, совершенно отличных системах. В первую очередь

предлагается согласиться с известным постулатом, в соответствии с которым «человек создает объекты себе подобными». Это мнение позволяет использовать подходы, используемые для повышения жизнедеятельности специалиста пенсионного возраста. Главным здесь является увеличение интенсивности контроля состояния здоровья. Для электроэнергетических объектов это звучит как «увеличение интенсивности контроля технического состояния» (далее – ТС). А это нам хорошо знакомо по рекомендации перехода от планового предупредительного ремонта к ремонту по ТС [7], подробными объяснениями целесообразности учета ТС [8, 9, 10] и повышения интенсивности контроля. Аналогом оперативного контроля ТС является ежемесячная подготовка формы 3-тех(энерго) [11], характеризующей ТС энергоблоков тепловых электростанций. Однако далеко не всегда такая возможность существует. Наглядными примерами указанных объектов являются воздушные ЛЭП (далее – ВЛЭП) с номинальным напряжением 110 кВ и выше. При разработке методов и алгоритмов оценки показателей оперативной надежности и безопасности в иллюстративных целях будут использованы именно эти ВЛЭП.

## 1. Методические особенности оценки показателей оперативной надежности ВЛЭП

Формулы оценки показателей надежности ВЛЭП хорошо известны и десятки лет до настоящего времени используются для анализа причин возникновения аварийных отключений. Повышение безошибочности рекомендаций достигается привлечением статистических данных за ряд лет наблюдения. В справочниках и технической литературе приводятся оценки удельной повреждаемости, средней длительности простоя в аварийном и плановом (капитальном) ремонте. Оценки усреднены, как правило, по классу напряжения, изредка – по причинам отказа или материалу опор. Удельная повреждаемость приводится к ВЛЭП протяженностью 100 км. Иначе говоря, классификация статистических данных проводится традиционно по одному, максимум трем признакам. Алгоритм использования этих оценок, по рекомендации Розанова М.Н. (1984 г.), заключается в следующем: «нужно вычислить частоту отказов для ряда лет эксплуатации, построить график и экстраполировать частоту отказов

примерно на пять лет вперед. Полученную частоту отказов следует использовать при оценке надежности вновь сооружаемых объектов». В табл. 1 по данным Гук Ю.Б. (1974 г.) приведены интервалы изменения оценок удельного числа повреждений ВЛЭП.

**Табл. 1. Интервалы изменения оценок удельного числа повреждения ВЛЭП.**

| Напряжение, кВ | Удельное число повреждений, на 100 км/год |              |
|----------------|---|--------------|
|                | Устойчивые                                | Неустойчивые |
| 100; 154       | 0,5-1,7                                   | 5-7          |
| 220            | 0,25-1,5                                  | 1-2          |
| 330            | 0,15-1,6                                  | 0,5-1,5      |
| 500            | 0,2-1,1                                   | 0,15-2,5     |

Эти данные интересны тем, что интервалы изменения удельного числа повреждений пересекаются, что свидетельствует о нецелесообразности их классификации по признаку «класс напряжения». Вышеизложенное позволяет заключить, что существующие методы оценки показателей надежности ВЛЭП неприемлемы для оценки показателей оперативной надежности. В табл. 2 приведены рекомендуемые основные показатели оперативной надежности ВЛЭП и формулы их расчета.

## 2. Методические особенности сравнения оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП

Как было отмечено выше, «механическое» сравнение оценок показателей оперативной надежности связано с большим риском ошибочного решения и обусловлено случайным характером сопоставляемых оценок. Не-

сомненна актуальность следующей эксплуатационной задачи: *оценка степени влияния на надежность ВЛЭП ЭЭС исполнения принятых ранее решений по реорганизации эксплуатации, изменения системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР)*. Эта оценка проводится путем сравнения показателей оперативной надежности до и после этих изменений.

Не менее актуальна и задача: *контроль безошибочности наблюдаемых закономерностей изменения показателей оперативной надежности во времени* с целью использования этой закономерности для прогнозирования надежности. Учет случайного характера статистических показателей принято проводить на основе теории проверки статистических гипотез. Но, поскольку основной задачей риск-ориентированного подхода является снижение риска ошибочного решения, недопустимо пренебрегать требованиями, в соответствии с которыми:

- закон распределения случайных величин должен быть известен;
- применения критериев проверки статистических гипотез, рассчитанных для одномерных случайных величин, к многомерным резко увеличивает риск ошибочного решения.

Рассматриваемые при анализе надежности ВЛЭП случайные величины далеко не всегда соответствуют нормальному закону, а оценки показателей оперативной надежности – многомерны.

Преодоление этих трудностей достигнуто применением фидуциального подхода, имитационного моделирования и руководящих принципов теории проверки статистических гипотез [12]. С высокой степенью точности моделирующие алгоритмы для ряда показателей оперативной надежности могут быть заменены разработанным экспресс-методом, основанным на аппроксимации фидуциальных распределений некоторой

**Табл. 2. Рекомендуемые показатели оперативной надежности ВЛЭП.**

| Наименование показателя                                 | Условное обозначение | Единица измерения | Формула оценки  |
|---|----------------------|-------------------|---|
| Параметр потока отказов                                 | $\lambda_i^*$        | отк./км.мес       | $\left[ \sum_{i=1}^{N_i} n_{\Sigma,i,j} \right] / b_L \sum_{j=1}^{N_i} L_j$ |
| Параметр потока устойчивых отказов                      | $\omega_i^*$         | отк./км.мес       | $\left[ \sum_{i=1}^{N_i} n_{y,i,j} \right] / b_L \sum_{j=1}^{N_i} L_j$      |
| Среднемесячная вероятность устойчивого отказа           | $R_{y,i}^*$          | о.е.              | $\frac{\omega_i^*}{\lambda_i^*}$  |
| Среднемесячная длительность простоя в аварийном ремонте | $M_i^*(\tau_a)$      | час./мес.         | $\left[ \sum_{j=1}^{n_{y,i}} \tau_{a,i,j} \right] / n_{y,i}$                |
| Среднемесячный коэффициент простоя в аварийном ремонте  | $K_{п,i}^*$          | о.е.              | $K_{п,i}^* = \frac{M_i^*(\tau_a) \cdot \omega_i^*}{T_i}$                    |

*Примечание:*  $N_i$  – число работающих ВЛЭП в  $i$ -ом месяце;  $n_{\Sigma,i,j}$  – число отказов  $j$ -ой ВЛЭП в  $i$ -ом месяце;  $L_j$  – длина  $j$ -ой ВЛЭП, км;  $n_{y,i,j}$  – число устойчивых отказов  $j$ -ой ВЛЭП в  $i$ -ом месяце;  $\tau_{a,i,j}$  – длительность простоя в аварийном ремонте  $j$ -ой ВЛЭП в  $i$ -ом месяце;  $b_L = 1/L_y$  – коэффициент, характеризующий длину условной линии ( $L_y$ ).

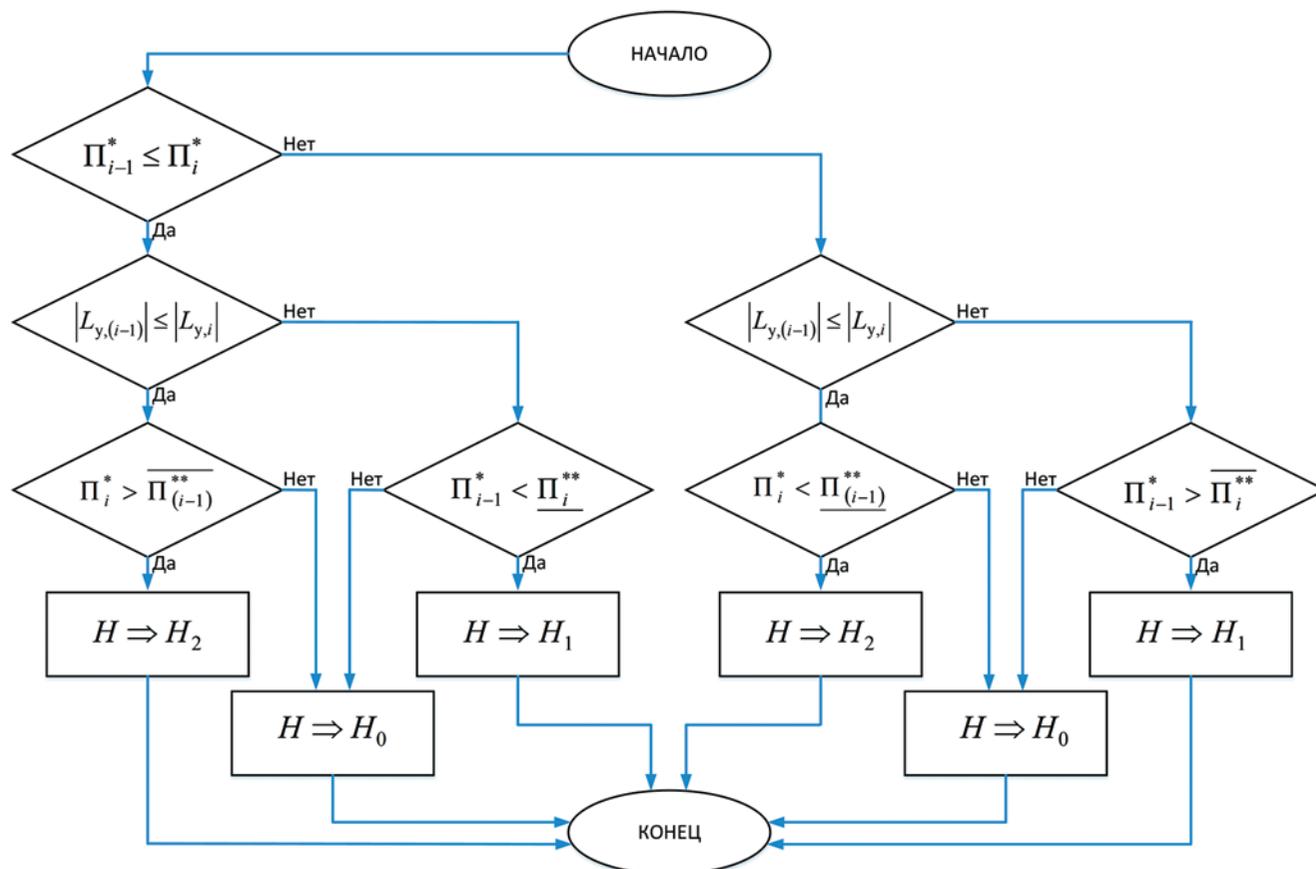


Рис. 1. Алгоритм сравнения оценок

нелинейной функций [13]. В отличие от формул для оценки показателей оперативной надежности ВЛЭП, алгоритмы сравнения среднемесячных оценок показателей оперативной надежности идентичны. Обозначим оценку (\*) обобщенного показателя (П) оперативной надежности как  $\Pi^*$ . Алгоритм сравнения среднемесячной оценки  $\Pi^*$  в  $i$ -ом месяце  $\Pi_i^*$  со среднемесячной оценкой в предшествовавшем  $(i - 1)$  месяце  $\Pi_{i-1}^*$  имеет следующий вид (рис. 1).

В иллюстративных целях формулы для расчета граничных значений фидуциального интервала оценок  $K_{\Pi,(i-1)}^*$  и  $K_{\Pi,i}^*$  приведены в табл. 3.

**Табл. 3. Формулы оценок граничных значений фидуциального интервала: условных коэффициентов простоя в аварийном ремонте ВЛЭП ЭЭС за  $(i - 1)$  и  $i$ -ый месяцы года**

| Показатель                       | Формулы оценки   | Примечание                                   |
|----------------------------------|--|--|
| $\underline{K_{\Pi,(i-1)}^{**}}$ | $K_{\Pi,(i-1)}^* \cdot \left(1 - A_\alpha / \sqrt{J_{(i-1)}}\right)$ | $J_{(i-1)} = b_L \sum_{j=1}^{N_{(i-1)}} L_j$ |
| $\overline{K_{\Pi,(i-1)}^{**}}$  | $K_{\Pi,(i-1)}^* \cdot \left(1 + A_\beta / \sqrt{J_{(i-1)}}\right)$  |  |
| $\underline{K_{\Pi,i}^{**}}$     | $K_{\Pi,i}^* \cdot \left(1 - A_\alpha / \sqrt{J_i}\right)$           | $J_i = b_L \sum_{j=1}^{N_i} L_j$             |
| $\overline{K_{\Pi,i}^{**}}$      | $K_{\Pi,i}^* \cdot \left(1 + A_{(1-\beta)} / \sqrt{J_i}\right)$      |  |

### 3. Методические особенности ранжирования оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭСП ЭЭС

Анализ изменения оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС конечно важен, хотя бы с точки зрения оценки влияния на надежность работы проводимых мероприятий по совершенствованию эксплуатации, ТОиР ВЛЭП. Ясно, что все эти мероприятия проводятся в определенных ЭСП и на определенных ВЛЭП. Выбор этих ВЛЭП и ЭСП проводится исходя из опыта эксплуатации, интуитивно, а часто и субъективно. Такой подход не случаен. Просто отсутствует какая-либо «подсказка», позволяющая выявить эти «слабые звенья» и снизить риск ошибочного решения. Ниже приводится метод и алгоритм решения этой задачи.

Предположим, что нам удалось оценить показатели оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС, а классифицируя данные по перечню ЭСП, оценить показатели оперативной надежности ВЛЭП каждого ЭСП. Заметим, что в настоящем разделе рассматриваются разновидности признака, по которым целесообразно ранжировать для выявления ЭСП, ТС ВЛЭП которых требует вмешательства. Ранжировать их, т.е. размещать в порядке снижения оперативной надежности, также не представляет особого труда. А трудность заключается в том, что

все эти оценки показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭСП имеют случайный характер, что исходит из случайного характера их отказов. Иначе говоря, наблюдаемое различие оценок, как и их отличие от показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС, может быть случайным, а сама классификация бесполезна. Мы с этим фактом встретились при анализе удельного числа ВЛЭП различных классов напряжения (см. табл. 1).

Но прежде чем рассмотреть возможность преодоления отмеченной выше трудности, необходимо иметь в виду, что:

– рекомендуемый метод и алгоритм не зависят от типа показателя оперативной надежности. Поэтому мы сохраним смысл оценок  $\overline{P_{\Sigma,j}^*}$ ,  $\overline{P_{\Sigma,j}^{**}}$ ,  $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$ ,  $\overline{P_{v,i,j}^*}$ ,  $\overline{P_{v,i,j}^{**}}$ ,  $\overline{P_{v,i,j}^{***}}$  и лишь учтем, что  $j$  – порядковый номер месяца,  $j = 1, 12$ ;  $i$  – порядковый номер разновидностей  $v$  признака,  $i = 1, m_v$ ;  $v$  – порядковый номер признака,  $v = 1, m_n$ ;  $m_n$  – число рассматриваемых признаков;

– граничные значения фидуциального интервала случайно различаются друг от друга с уровнем значимости  $2\alpha$ . Иначе говоря, случайный характер расхождения показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС и ряда ЭСП еще не означает случайный характер расхождения всех показателей оперативной надежности ВЛЭП этих ЭСП.

Рекомендуемый метод и алгоритм ранжирования оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭСП ЭЭС сводится к следующей последовательности вычислений:

– расположенные в порядке возрастания оценки  $\overline{P_{v,i,j}^*}$  сопоставляются с  $\overline{P_{\Sigma,j}^{**}}$ . Выделяются в первую группу оценки  $\overline{P_{v,i,j}^*}$  не превышающие  $\overline{P_{\Sigma,j}^{**}}$ , как оценки не случайно различающиеся с оценкой  $\overline{P_{\Sigma,j}^{**}}$ ;

– оставшиеся оценки  $\overline{P_{v,i,j}^*}$  сопоставляются с  $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$ . Оценки  $\overline{P_{v,i,j}^*}$  не превышающие  $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$  составляют вторую группу и характеризуются как оценки случайно различающиеся с  $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$ ;

– часть оценок  $\overline{P_{v,i,j}^*}$  которая превышает  $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$  относится к третьей группе. Рейтинг первой группы ( $r_1$ ) ЭСП условимся оценивать как «хороший», второй группы ( $r_2$ ) ЭСП – как «удовлетворительный», а третьей группы ( $r_3$ ) ЭСП – как «неудовлетворительный».

Объективное ранжирование оперативной надежности ВЛЭП ЭСП предполагает преодоление еще одной трудности – наличие множества показателей. Эта трудность преодолевается переходом к интегральному показателю. Рекомендуемая методология расчета интегрального показателя была использована при анализе оперативной надежности энергоблоков тепловых электростанций [14].

Суть рекомендаций сводится:

– к переходу от оценки показателя оперативной надежности к оценке ее вероятности по статистической

функции распределения  $F^*(P_{v,i,j}^*)$ ; величина  $F^*(P_{v,i,j}^*)$  характеризует величину «износа» и определяется по формуле  $Iz^*(P_{v,i,j}^*) = i_v / m_n^2$ , где  $i_v$  – порядковый номер  $v$ -го показателя ЭСП в ранжированном ряду данных за  $j$ -й месяц;  $v = 1, m_n$ ,  $m_n$  – число показателей оперативной надежности;

– к расчету интегрального показателя оперативной надежности по формуле

$$In^*(Iz) = M^*[Iz^*(P_{i,j})] = \sum_{v=1}^{m_v} i_v / m_n^2.$$

Не менее значимой следует считать и задачу оценки степени повышения оперативной надежности в результате предполагаемого изменения ТОиР ВЛЭП ЭСП.

Рассмотрим методологию решения этой задачи на примере средней длительности простоя в аварийном ремонте  $M_{\Sigma}^*(\tau_a)$ . Предположим, что по статистическим данным за  $j$ -ый месяц работы установлено, что:

– среднемесячная оценка  $M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{\Sigma}} \tau_{a,i,j} / n_{\Sigma}$ , где  $n_{\Sigma}$  – частота простоев в аварийном ремонте;

– в результате классификации статистических данных ВЛЭП по ЭСП, их ранжирования в порядке снижения оперативной надежности и оценки характера расхождения с  $M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})$  установлено, что среднемесячные оценки  $M_{v,j}^*(\tau_{a,i})$  каждой из трех групп ЭСП соответственно равны:

$$M_{r_1,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{r_1}} \tau_{a,i,j} / n_{r_1};$$

$$M_{r_2,j}^*(\tau_{a,j}) = M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{r_2}} \tau_{a,i,j} / n_{r_2};$$

$$M_{r_3,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{r_3}} \tau_{a,i,j} / n_{r_3};$$

где  $n_{r_1}$ ,  $n_{r_2}$ ,  $n_{r_3}$  – соответственно число реализаций длительности аварийного простоя в первой, второй и третьей группах ЭСП.

Поскольку в третьей группе размещаются ЭСП, среднемесячная длительность простоя в аварийном ремонте которых неслучайно превышает  $M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})$ , то, естественно, необходимо, прежде всего, обеспечить восстановление износа ВЛЭП ЭСП третьей группы. Очевидно, что в результате восстановления износа среднемесячное значение  $M_{r_3,j}^*(\tau_{a,j})$  будет случайно отличаться от ВЛЭП ЭСП первой группы. При этом снижение продолжительности простоя в аварийном ремонте ЭСП третьей группы будет равно

$$\Delta \sum_{i=1}^{n_{r_3}} \tau_{a,i,j} = \sum_{i=1}^{n_{r_3}} \tau_{a,i,j} - M_{r_1,j}^*(\tau_{a,j}) n_{r_3,j}$$

А относительная величина этого снижения равна:

$$\delta M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j}) = \frac{n_{r3,j} [M_{r3,j}^*(\tau_{a,j}) - M_{r1,j}^*(\tau_{a,j})]}{n_{\Sigma,j} \cdot M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})}$$

По аналогии могут быть получены формулы оценки относительной величины изменения оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС и для других показателей. Результаты этих преобразований приведены в табл. 4.

**Табл. 4. Формулы оценки возможного изменения оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС в результате восстановления износа**

| Показатель                          | Формулы расчета возможного повышения оперативной надежности  |
|-------------------------------------|--|
| $\delta \lambda_{\Sigma,j}^*$       | $\left[ b_L (\lambda_{r3,j}^* - \lambda_{r1,j}^*) \sum_{i=1}^{N_{r3,j}} L_i \right] / \left[ b_L \lambda_{\Sigma,j}^* \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} L_i \right]$ |
| $\delta \omega_{\Sigma,j}^*$        | $\left[ b_L (\omega_{r3,j}^* - \omega_{r1,j}^*) \sum_{i=1}^{N_{r3,j}} L_i \right] / \left[ b_L \omega_{\Sigma,j}^* \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} L_i \right]$    |
| $\delta M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})$ | $\frac{n_{r3,j} [M_{r3,j}^*(\tau_{a,j}) - M_{r1,j}^*(\tau_{a,j})]}{n_{\Sigma,j} M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})}$   |
| $\delta K_{\Pi,\Sigma,j}^*$         | $\frac{\omega_{r3,j} [M_{r3,j}^*(\tau_{a,j}) - M_{r1,j}^*(\tau_{a,j})]}{\omega_{\Sigma,j} M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})}$                                     |
| $\delta R_{\Sigma,j}^*$             | $\frac{n_{r3,j} [R_{r3,j}^* - R_{r1,j}^*]}{n_{\Sigma,j} R_{\Sigma,j}^*}$   |

#### 4. Методические особенности бенчмаркинга оперативной надежности ЭСП ЭЭС.

Бенчмаркинг ЭСП ЭЭС относится к категории внутренних. Напомним, что внутренний бенчмаркинг [15]:

- это вид сравнительного анализа;
- суть его заключается в выявлении наиболее и наименее эффективных однотипных объектов;
- это наименее затратный вид исследования;
- его основная задача – выявить объекты, повышение эффективности работы которых в наибольшей степени повышает эффективность работы системы в целом;
- благодаря своей простоте является лучшим способом снижения риска ошибочного решения;
- наибольший эффект имеет место лишь при систематическом сравнительном анализе. Одноразовое применение приводит лишь к временному успеху.

Сравнительный анализ оперативной надежности совокупности ВЛЭП ЭСП ЭЭС позволяет безошибочно

решать многие эксплуатационные задачи на уровне ЭЭС. Но он совершенно недостаточен для самих ЭСП. И действительно. Руководству ЭСП, конечно, важно знать, насколько руководимое им ЭСП отличается от других ЭСП энергосистемы, как изменилась надежность работы ВЛЭП в расчетном месяце, насколько эффективны были новые подходы к распознаванию аварийно-опасных дефектов. Но, в первую очередь, руководитель ЭСП должен точно знать, на что направить усилия для повышения рейтинга ЭСП.

Как уже отмечалось выше, «механическая» классификация ВЛЭП ЭСП связана с высоким риском ошибочного решения. Для выявления «слабых звеньев», снижающих рейтинг ЭСП, необходимо:

- для каждого ЭСП, рейтинг ТС которых оценивается как неудовлетворительный:

- классифицировать ВЛЭП и статистических данных об их простое в аварийном ремонте по каждому из  $n_{\Pi}-1$  заданных признаков (за исключением признака наименование ЭСП) и его разновидностям. Предварительно при непрерывном характере изменения разновидностей признаков, они трансформируются в дискретные;

- для каждой разновидности признака вычисляется оценка показателя оперативной надежности  $\Pi_{v,i,j}^*$ ;

- определяется максимальное значение оценок  $\Pi_{v,i,j}^*$ ,  $v = 1, m_i$ , где  $m_i$  – число разновидностей  $i$ -го признака;

$\Pi_{\max,i,j}^* = \max \{ \Pi_{1,i,j}^*, \dots, \Pi_{m_i,i,j}^* \}$ . Очевидно, что это наиболее значимая разновидность  $i$ -го признака;

- определяется наиболее значимый признак

$$\Pi_{\max,j}^* = \max \{ \Pi_{\max,1,i,j}^*; \Pi_{\max,2,i,j}^*; \dots; \Pi_{m_i,n_i,j}^* \};$$

- определяются признаки, оценки показателей оперативной надежности которых превышают оценку  $\Pi_{r3,j}^*$ ;

- именно по этим признакам проводится классификация ВЛЭП и статистических данных об их простое в аварийном ремонте, по которым рассчитана оценка  $\Pi_{\max,j}^*$ ;

- далее расчеты проводятся аналогично вышеизложенному. Расчеты завершаются при рассмотрении всех возможных и целесообразных классификаций и всех ЭСП с неудовлетворительным рейтингом.

В результате проведенных вычислений для каждого ЭСП с неудовлетворительным рейтингом определяется совокупность ВЛЭП, обуславливающих этот рейтинг. Именно этот перечень и рекомендуется для восстановления ТС ВЛЭП.

#### 5. Формирование информационной и методической поддержки руководства ЭСП и ЭЭС

Ценой повышения достоверности риск-ориентированного подхода, естественно, является повышение наукоемкости, громоздкости ручного счета. Проверка достоверности осуществляется методом решения «об-

ратной задачи», когда рекомендации тривиальны. Усилия требуются лишь для подготовки в табличной форме ежемесячных сведений об автоматических аварийных отключениях ВЛЭП. В день ввода информации главные инженеры ЭЭС и ЭСП получают специализированные формы, содержащие сведения об оперативной надежности, соответственно, ВЛЭП ЭЭС и ЭСП и рекомендации по повышению эффективности работы. Сведения об оперативной надежности и рекомендации для ВЛЭП ЭСП предварительно утверждаются главным инженером ЭЭС [16].

## Заключение

- 1) Предложена совокупность показателей оперативной надежности и формулы их оценки;
- 2) Разработан новый алгоритм оценки целесообразности классификации многомерных данных об отказах и длительности простоя ВЛЭП. На каждом этапе классификации совокупность ВЛЭП представляется тремя группами. Первая группа включает ЛЭП, оценка показателя оперативной надежности которых неслучайно меньше оценки аналогичного показателя для совокупности ЛЭП; вторая группа включает ЛЭП, оценка показателя оперативной надежности которых случайно отличается от аналогичного показателя для совокупности ЛЭП; третья группа включает ЛЭП, оценка показателя оперативной надежности которых неслучайно больше оценки аналогичного показателя для совокупности ЛЭП;
- 3) Разработаны методы и алгоритмы сравнения двух многомерных оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП, позволяющие оценить характер изменения надежности этих ЛЭП во времени;
- 4) Разработаны методы и алгоритмы ранжирования показателей оперативной надежности ВЛЭП электросетевых предприятий, позволяющих выявить ЛЭП, требующих оперативного освидетельствования;
- 5) Разработаны методы и алгоритмы расчета оценки интегрального показателя оперативной надежности;
- 6) Обеспечивается ежемесячная информационная и методическая поддержка технического руководства электросетевых предприятий и электроэнергетической системы. Методическая поддержка включает рекомендации по повышению надежности ЛЭП.

## Библиографический список

1. Волкова И.О. Концепция построения системы управления активами электросетевых компаний в России на основе бенчмаркинга // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2008. № 2. С. 101–108.
2. Карпов Н.В. Стратегия управления производственными активами электросетевой компании //

Вестник Омского университета. Серия: Экономика: Науч. журн. 2019. Т. 17. № 2. С. 112-123. DOI: 10.25513/1812-3988.

3. Грабчак Е.П. Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики // Надежность и безопасность в энергетике. 2017. Т. 10. № 4. С. 268-274.
4. V Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики»: сборник трудов. Москва, 2018.
5. VI Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики»: сборник трудов. Москва, 2019.
6. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников; под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. 3-е изд. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2019. 560 с.
7. СТО-34.01-24-003-2017. Стандарт организации ПАО «Россети». Система управления производственными активами. Порядок фиксации и классификации дефектов. Порядок ведения электронного журнала дефектов. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 21.04.2017 № 212р. 22 с.
8. СТО-34.01-23.1-001-2017. Стандарт организации ПАО «Россети». Объем и норма испытания электрооборудования. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 29.05.2017 № 280р. 262 с.
9. СТО-34-01-24-002-2018. Стандарт организации ПАО «Россети». Организация технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 16.10.2018 № 456р. 110 с.
10. СТО-34.01-35-001-2020. Стандарт организации ПАО «Россети». Методические указания по проведению технического освидетельствования оборудования подстанций, линий электропередачи. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 21.12.2020 № 418. 20 с.
11. РД 34.09.453 Типовой алгоритм расчета технико-экономических показателей мощных отопительных ТЭЦ. СПО «Союзтехэнерго», 1983 (актуализация 01.01.2021).
12. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. Фидуциальный подход при сравнении однотипных объектов // Электронное моделирование. 2019. № 1. С. 55-66. DOI: 10.15407/emodel.42.01.013
13. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. и др. Метод и алгоритм сравнения эффективности работы газопоршневых электростанций электроэнергетических систем // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 2. С. 106-117. DOI: 10.1134/S0002331019020067
14. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. и др. Сравнение и ранжирование паротурбинных установок энергоблоков ТЭС по эффективности работы // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 41-49. DOI: 10.1134/S0040363618100028

15. Кане М.М., Иванов Б.В. и др. Системы, методы и их инструменты менеджмента качества. 2-ое изд. СПб.: Ид. «Питер», 2017. 576 с.

16. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К. и др. Обеспечение достоверности методической поддержки объектов электроэнергетических систем // Электричество. 2020. № 2. С. 4-9. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-2-4-9

## References

1. Volkova I.O. Conception of network company's asset management system creation in Russia on benchmarking base. *π-Economy* 2008;2:101-108. (in Russ.)

2. Karpov N.V. [A strategy for managing industrial assets of an electric grid company]. *Herald of Omsk University. Series "Economics"* 2019;17(2):112-123. DOI: 10.25513/1812-3988. (in Russ.)

3. Grabchak E.P. Assessment of technical condition of power equipment in conditions of digital economy. *Safety and Reliability of Power Industry* 2017;10(4):268-274. (in Russ.)

4. [Proceedings of the V Science and Practice Conference Monitoring the Technical State of Electric Power Facilities]. Moscow; 2018. (in Russ.)

5. [Proceedings of the VI Science and Practice Conference Monitoring the Technical State of Electric Power Facilities]. Moscow; 2019. (in Russ.)

6. Danilov G.A., Denchik Yu.M., Ivanov M.N., Sitnikov G.V. Gorelov V.P., Salnikov V.G., editors. [Improving the operational performance of power transmission lines. 3rd ed.]. Moscow; Berlin: Direct Media; 2019. (in Russ.)

7. [STO-34.01-24-003-2017. ROSSETI standard. Operational asset management system. Procedure for recording and classifying defects. Procedure for electronic logging of defects. Approved by the order of ROSSETI dated 04.21.2017 No. 212p.]. (in Russ.)

8. [STO-34.01-23.1-001-2017. ROSSETI standard. Scope and code for testing electrical equipment. Approved by the order of ROSSETI dated 05.29.2017 No. 280r.]. (in Russ.)

9. [STO-34-01-24-002-2018. ROSSETI standard. Organisation of maintenance and repair of electric power facilities. Approved by the order of ROSSETI dated 16.10.2018 No. 456r.]. (in Russ.)

10. [STO-34.01-35-001-2020. ROSSETI standard. Methodological guidelines for technical certification of substation equipment and power transmission lines. Approved by order of ROSSETI dated 12.21.2020 No. 418]. (in Russ.)

11. [RD 34.09.453. Standard algorithm for calculating key performance indicators of powerful heating power plants. (updated 01.01.2021)]. SPO Soyuztekhenergo; 1983. (in Russ.)

12. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Rafiyeva T.K., Abdullayeva S.A. Fiducially approach in maintenance of homogeneous technical and economic param-

eters. *Elektron. model.* 2020;42(1):13-24. DOI: 10.15407/emodel.42.01.013. (in Russ.)

13. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. et al. Method and algorithm a comparison efficiency of gas and piston power stations of the electro power systems. *Izvestiya RAN. Energetika* 2019;2:106-117. DOI: 10.1134/S0002331019020067. (in Russ.)

14. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z., Abdullayeva S.A. Comparison and ranking of steam-turbine installations of thermal power-stations' power-generating units by working efficiency. *Thermal Engineering* 2018;65(10):708-715.

15. Kaneh M.M., Ivanov B.V. et al. [Quality management systems, methods, and tools. 2-nd ed.]. St. Petersburg: Izd. Piter; 2017. (in Russ.)

16. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Rafiyeva T.K. et al. Ensuring the validity of methodical support for managing electric power system components. *Elektrichestvo* 2020;2:4-9. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-2-4-9 (in Russ.)

## Сведения об авторах

**ФАРХАДЗАДЕ Эльмар Мехтиевич, д.т.н., профессор.** В 1961 году окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ) г. Баку. В 1982 году защитил докторскую диссертацию по теме «Точность и достоверность характеристик надежности электроустановок» в Новосибирском электротехническом институте (НЭТИ). Главный научный сотрудник АзНИПИИ Энергетики г. Баку. Область научных исследований – надежность и эффективность электроэнергетических систем. E-mail: elmeht@rambler.ru Адрес: AZ1012, г. Баку, пр. Г.Зардаби 94

**МУРАДАЛИЕВ Айдын Зураб оглу, д.т.н., доцент.** В 1982 году окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ) г. Баку. В 2013 году защитил докторскую диссертацию по теме «Разработка методов и алгоритмов расчета показателей индивидуальной надежности оборудования и устройств ЭЭС». Ведущий научный сотрудник отдела «Надежность оборудования энергосистемы» АзНИПИИ Энергетики г. Баку. Область научных исследований – количественная оценка индивидуальной надежности оборудования и устройств электроэнергетических систем. E-mail: aydin\_murad@yahoo.com. Адрес: AZ1012, г.Баку, пр. Г. Зардаби 94

**АБДУЛЛАЕВА Самира Афган кызы, к.т.н.** В 1990 году окончила энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ) г. Баку. В 2018 году защитила кандидатскую диссертацию. Старший научный сотрудник отдела «Надежность оборудования энергосистемы» Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института Энергетики, г. Баку.

## About authors

**Elmar M. Farkhadzade**, Doctor of Engineering, Professor. In 1961, he graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry (AzINEFTEKHIM) in Baku. In 1982, he defended his doctoral dissertation on the 'Accuracy and reliability characteristics of electrical installations' in the Novosibirsk Electrotechnical Institute (NETI). Chief scientific officer of AzNIPPI Energetics in Baku. His field of research is reliability and efficiency of electrical power systems. E-mail: elmeht@rambler.ru Address: AZ1012, Baku, 94, G.Zardabi Ave.

**Aydin Z. Muradaliyev**, Doctor of Engineering, Associate Professor. In 1982, he graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry (AzINEFTEKHIM) in Baku. In 2013, he defended his doctoral thesis titled 'Development of methods and algorithms for calculating the indicators of individual reliability of equipment and devices of EES'. Lead researcher, Reliability of Power System Equipment, AzNIPPI Energetika, Baku. His field of research is quantitative estimation of individual reliability of equipment and devices of electrical power systems. E-mail: aydin\_murad@yahoo.com. Address: 94 G. Zardabi Ave., Baku, AZ1012.

**Samira A. Abdullaeva**, Candidate of Engineering. In 1990, she graduated from the Faculty of Energy of the Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry (AzINEFTEKHIM), Baku. In 2018, she defended her PhD thesis. Senior Researcher, Reliability of Power System Equipment, Azerbaijan Research and Design and Survey Institute of Power Engineering, Baku.

## Вклад авторов

**Фархадзаде Э.М.** – обоснование актуальности исследования, постановка цели решаемой задачи и разработка методики исследования.

**Мурадалиев А.З.** – анализ источников информации, разработка алгоритмов и программного обеспечения решаемой задачи; обсуждение промежуточных результатов; подготовка материалов к публикации.

**Абдуллаева С.А.** – анализ источников информации; проведение расчетов и обсуждение промежуточных результатов; оформление статьи в целом.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Исследование двукратного и многократного нагружения стержневых образцов трубной стали

## A study of double and multiple loading of rod-type test samples made of pipe steel

Маянц Ю.А.<sup>1</sup>, Ширяпов Д.И.<sup>1</sup>, Носова Е.С.<sup>1</sup>  
Mayants Yu.A.<sup>1</sup>, Shiryapov D.I.<sup>1</sup>, Nosova E.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, Санкт-Петербург

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Russian Federation, Saint Petersburg

\*Y\_Mayants@vniigaz.gazprom.ru



Маянц Ю.А.



Ширяпов Д.И.



Носова Е.С.

**Резюме.** При испытаниях на прочность внутренним давлением магистральных трубопроводов значение испытательного давления принимается равным 1,1 от рабочего для участков нормальной категории и 1,25 либо 1,5 для участков повышенных категорий. Приведенные значения имеют обоснования, уходящие своими корнями середину XX-го века, и, возможно, нуждаются в переосмыслении в свете современных реалий применения трубных материалов нового поколения. Целью проводимого исследования является выявление оптимального значения коэффициента запаса при испытаниях на прочность магистральных трубопроводов с учетом материала труб, а также изменения разрушающего усилия при многократном нагружении образцов. Получаемые результаты позволят подтвердить либо пересмотреть существующий подход к назначению давления при проведении испытаний на прочность магистральных трубопроводов и разработать теоретическое обоснование наблюдаемых явлений. На практике это позволит установить оптимальные параметры испытаний газопроводов, обеспечивающие необходимую надежность и безопасность. Исследование актуально с учетом постоянного совершенствования трубных сталей, а также в свете развития инновационных материалов, предназначенных для производства труб. Анализ зарубежных и отечественных экспериментальных исследований двукратного нагружения стальных образцов до разрушения указывает на возможность снижения разрушающего усилия при втором нагружении до 90% от величины первого усилия. При этом доступная статистическая выборка зарубежных и отечественных экспериментов невелика, а методика их проведения – сложна. В связи с этим авторами была разработана оригинальная методика, по которой были проведены эксперименты двукратного нагружения стальных образцов до разрушения и выполнен статистический анализ полученных результатов.

**Abstract.** During transmission pipelines pressure testing, the value of the test pressure is taken to be equal to 1.1 of the working pressure for sections of the normal category and 1.25 or 1.5 for sections of higher categories. The substantiations of the above values date back to the middle of the 20-th century, and may need to be reconsidered in the light of the new-generation pipe materials implementation. This paper aims to identify the optimal safety factor for pressure testing of main pipelines, taking into account the material of the pipes, as well as the variation of the destructive power in case of multiple loading of the test objects. The findings will allow confirming or revising the existing approach to assigning the strength test pressure of main pipelines and theoretically substantiating the observed phenomena. In practice, that will allow establishing the optimal parameters for testing gas pipelines, ensuring the required dependability and safety. The research is relevant due to the continuous improvement of pipe steels, as well as in the light of innovative pipe material development. An analysis of foreign and Russian experimental studies involving double loading of steel test objects to failure indicates that – before the second loading – the destructive force can be reduced to 90% of the first loading value. The available statistical sample of foreign and Russian experiments is small, while the methodology is complex. Given the above, the authors developed an original methodology, that was used in destructive double loading experiments on steel test objects and statistical analysis of the results.

**Ключевые слова:** испытания на прочность, магистральный трубопровод, двукратное нагружение, многократное нагружение, статистический анализ.

**Keywords:** pressure test, trunk pipeline, double loading, multiple loading, statistical analysis.

**Для цитирования:** Маянц Ю.А., Ширяпов Д.И., Носова Е.С. Исследование двукратного и многократного нагружения стержневых образцов трубной стали // Надежность. 2024. №4. С. 38-47. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-38-47>

**For citation:** *Mayants Yu.A., Shiryapov D.I., Nosova E.S. A study of double and multiple loading of rod-type test objects made of pipe steel. Dependability 2024;4:38-47. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-38-47>*

**Поступила:** 24.05.2024 / **После доработки:** 02.09.2024 / **К печати:** 18.11.2024  
**Received on:** 24.05.2024 / **Revised on:** 02.09.2024 / **For printing:** 18.11.2024

## Введение

В связи со строительством новых газопроводов, увеличением давления транспортирования газа с одновременным ростом диаметров трубопроводов и вытекающей отсюда необходимостью повышения прочности труб, продолжают работы по внедрению труб более высоких классов прочности, труб, обладающих высокими деформационными свойствами и устойчивых к различным температурным воздействиям.

Применение новых материалов и конструктивных решений должно сопровождаться обеспечением надежной и бесперебойной эксплуатации магистрального газопровода в течение всего жизненного цикла, что обеспечивается:

- 1) системой контроля качества продукции, действующей на трубных заводах и включающей испытания труб пробным давлением;
- 2) обеспечением требований действующей нормативно-технической документации;
- 3) испытаниями на прочность внутренним давлением.

Кроме того, испытания на прочность внутренним давлением являются заключительным этапом в комплексе работ в рамках программы капитального ремонта действующих газопроводов. Таким образом, успешные заключительные испытания в настоящее время считаются достаточно надежным основанием для ввода вновь построенных или прошедших реконструкцию газопроводов в эксплуатацию.

Величина давления, назначаемого при испытаниях на прочность трубопровода, должна, с одной стороны, учитывать свойства и параметры труб, а с другой – подтвердить достаточный запас прочности, позволяющий надежно эксплуатировать трубопровод в течение всего его жизненного цикла.

Целью данной работы является определение оптимального значения давления при испытаниях на прочность магистральных трубопроводов, в том числе после их ремонта, а также с учетом используемых материалов.

## 1. Предпосылки к проведению экспериментального исследования

Подходы к назначению коэффициентов запаса при испытаниях трубопроводов и труб на прочность внутренним давлением менялись с течением времени, с учетом развития технологии производства труб и накопления статистики эксплуатации трубопроводов. На заре трубопроводного строительства отправной точкой стали параметры испытаний, применявшиеся ранее к котлам и иным сосудам, работающим под давлением [1], однако

в дальнейшем стало ясно, что специфика протяженных объектов, которыми являются магистральные трубопроводы, обуславливает свои подходы к назначению испытательного давления. До середины XX-го века, в тех случаях, когда испытания на прочность выполнялись в принципе, в качестве испытательной среды зачастую выступал транспортируемый продукт. Желая предотвратить потери продукта в случае разрыва (при испытаниях нефтью и нефтепродуктами), а также из-за опасения протяженных разрывов трубопроводов (при испытаниях природным газом), испытательное давление стремились установить с небольшим запасом относительно запроектированного рабочего, как правило, в пределах 10 %.

Однако по мере накопления знаний об изменении технического состояния трубопроводов в течение их жизненного цикла, становилось все яснее, что для безопасной работы трубопроводов необходимо опираться на более глубокие предпосылки. Богатым источником статистики о поведении трубопроводов, подвергшихся повышенным нагрузкам, стали комплексные переиспытания двух американских трубопроводов – Big Inch и Little Big Inch [2]. Эти трубопроводы, построенные в 1942-43 гг., были призваны обеспечить надежные поставки сырой нефти техасских месторождений на перерабатывающие мощности восточного побережья США для снабжения горюче-смазочными материалами союзных войск в Европе, в условиях, когда немецкие подводные лодки вели охоту на американские танкеры, сделав невозможными морские поставки внутри США.

После окончания Второй мировой войны указанные трубопроводы были выкуплены у государства частным инвестором, решившим конвертировать их в газопроводы, для чего был запущен проект их технического перевооружения и повышения надежности. Два трубопровода протяженностью более 2000 км каждый, имеющие диаметры 610 мм и 508 мм соответственно, в течение 1950-го года подверглись многократным испытаниям на прочность давлением, существенно превышающим рабочее, в ряде случаев – эквивалентным напряжениям предела текучести трубной стали в кольцевом направлении, а в ряде случаев – до 109 % от этого предела [3].

Результатом испытаний стали сотни разрывов трубопроводов в местах дефектов, вызванных самыми разными причинами, – от брака трубного производства, до внутренней и наружной коррозии (на некоторых участках в целях экономии времени трубы укладывались без изоляции). Однако после завершения испытаний трубопровод работал весьма надежно, информация о чем быстро распространилась по отрасли. Успешному примеру последовали собственники других трубопроводов, и уже к концу 1960-х годов в США была накоплена вну-

шительная база данных переиспытаний трубопроводов на давление, эквивалентное 90 % от предела текучести и выше [4, 5]. В отечественной практике также проводились аналогичные работы, позволившие получить ценные экспериментальные данные [6].

Собранная в результате статистика, в совокупности с последующими исследованиями института Баттеля (США) позволила впервые обоснованно установить параметры испытаний. Любопытно, что в нормах ASME B31.8 было указано требование к максимально допустимому рабочему давлению, выраженному в виде испытательного, поделенного на коэффициент запаса 1,1; 1,25, либо 1,4, что выглядит несколько странно применительно ко вновь построенному трубопроводу, но вполне объяснимо в случае действующего трубопровода, который подвергается сплошному переиспытанию.

По мере накопления опыта испытаний на прочность трубопроводов, инженеры столкнулись с так называемой инверсией давления [7]. Смысл этого явления состоит в том, что предварительно испытанные трубопроводы могли разрушаться вследствие подрастания дефектов при давлении ниже того, на которое они были испытаны. Опытным путем было установлено, что запас по давлению величиной в 10% обеспечивает достаточно надежную гарантию от инверсии давления. Таким образом, трубопроводы, испытанные на давление, эквивалентное 90 % от напряжений предела текучести, в дальнейшем допускалось эксплуатировать при давлении не выше 80 % от испытательного, или при напряжении 0,72 от предела текучести (либо с запасом величиной 1,25 от упомянутых 90 %, что в результате дает все те же 72 %).

Величина 72 % от предела текучести и по сей день остается отправной точкой при назначении проектного рабочего давления магистральных трубопроводов, как в зарубежных (США<sup>1</sup>, Нидерланды<sup>2</sup>, Великобритания<sup>3</sup> и ряд других), так и в отечественных нормативных документах<sup>4</sup>. В ряде случаев это базовое значение может изменяться как в большую, так и в меньшую сторону, в зависимости от условий прохождения трубопровода [8, 9]. Учитывая развитие трубного производства, а также техники и технологий контроля качества сооружения трубопроводов, отдельные современные стандарты пересматривают эту базовую величину в сторону увеличения, в частности, последними ревизиями стандартов Канады<sup>5</sup> и Австралии<sup>6</sup> уже установлена величина 80%.

В процессе строительства трубопровод подвергается значительным нагрузкам и воздействиям, может

получить те или иные повреждения, которые не были или не могли быть обнаружены средствами контроля и диагностики. С этой точки зрения, испытания должны подтвердить, что трубопровод не имеет опасных дефектов, ставших следствием строительно-монтажных работ. Таким образом, организационная задача испытаний состоит в том, чтобы исключить эти неизвестные факторы, задавая начальное техническое состояние трубопровода и подтверждая, что трубопровод сможет безотказно эксплуатироваться при рабочих нагрузках.

Исходя из вышеизложенного, представляется актуальным исследовать поведение современных трубных сталей при предельных нагрузках, а также при повторном нагружении трубопроводов, что позволит оценить применимость существующих требований к испытаниям на прочность к трубопроводам нового поколения, и, при необходимости, пересмотреть их.

## 2. Условия и постановка эксперимента

Задача эксперимента состоит в том, чтобы имитировать в лабораторных условиях последовательное нагружение металла труб до давления, соответствующего их разрыву, подобно тому, как это происходило при испытаниях на прочность протяженного участка трубопровода, когда давление всякий раз повышалось до разрыва наименее прочной трубы.

Для эксперимента были изготовлены образцы специальной формы, позволяющей осуществить двукратное нагружение, а также пятикратное последовательное нагружение образцов до разрыва.

Для изготовления образцов была использована сталь 20 Г, относящаяся к марганцовистой группе легированных сталей согласно классификации, принятой отечественными стандартами<sup>7</sup>.

Подробное описание образцов, включая их форму и геометрические параметры, приведено далее в настоящей статье. Для полноты данных об используемом материале, до начала основного эксперимента была построена экспериментальная диаграмма растяжения стандартных образцов.

Целью эксперимента является выявление закономерности в полученных значениях усилия разрыва на различных этапах многократного нагружения, в частности установить, возможно ли разрушение на втором и последующем этапах при давлении, меньшем, чем то, при котором произошел один из предыдущих разрывов. Эксперимент проводится в развитие анализа двукратного нагружения трубопровода внутренним давлением, выполненного ранее одним из авторов на основе данных более ранних исследований [10], и имеет целью повысить качество эксперимента за счет исключе-

<sup>1</sup> Gas Transmission and Distribution Piping Systems. ASME B31.8-2022.

<sup>2</sup> Requirements for pipeline systems - Part 1: General requirements NEN 3650-1:2020 nl.

<sup>3</sup> Pipeline systems - Steel pipelines on land. Code of practice PD 8010-1:2015+A1:2016.

<sup>4</sup> СТО Газпром 2 2.1 249 2008 Магистральные газопроводы.

<sup>5</sup> Oil and gas pipeline systems. CSA Z662:23.

<sup>6</sup> Pipelines - Gas and liquid petroleum, Part 1: Design and construction AS/NZS 2885.1:2018.

<sup>7</sup> ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.

Табл. 1. Основные параметры образцов до и после испытаний

| № образца | Диаметр образца       |  | Длина образца         |                              |
|-----------|-----------------------|--|-----------------------|------------------------------|
|           | начальный, $d_0$ , мм | наименьший диаметр шейки образца после разрыва, $d_*$ , мм | начальная, $l_0$ , мм | после растяжения, $l_*$ , мм |
| 1         | 6,1                   | 3,2  | 42                    | 59,5                         |
| 2         | 6,1                   | 3,2  | 42                    | 58,9                         |

ния случайных факторов, а также применения металла, схожего с тем, из которого изготавливаются трубы для современных газопроводов.

### 3. Ход эксперимента

#### 3.1. Получение диаграммы растяжения

Диаграмма растяжения металла была получена в результате испытаний на растяжение двух стандартных цилиндрических образцов, изготовленных в соответствии с требованиями нормативной документации<sup>1</sup>. Основные параметры образцов до и после испытаний приведены на рис. 1 и в табл. 1. Полученные диаграммы растяжения представлены на рис. 2, их основные характеристики сведены в табл. 2.

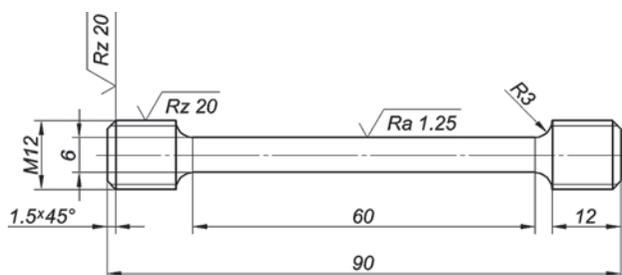


Рис. 1. Стандартный пропорциональный цилиндрический образец (тип IV по ГОСТ 1497)

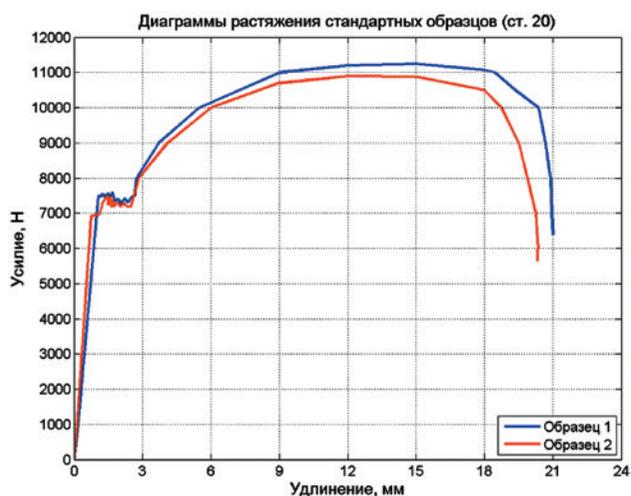


Рис. 2. Диаграммы растяжения стандартных образцов

Табл. 2. Основные параметры испытаний

| Параметр                            | Единицы измерения | Значение  |        |
|-------------------------------------|-------------------|-----------|--------|
|                                     |                   | № образца |        |
|                                     |                   | 1         | 2      |
| Скорость испытания                  | мм/мин            | 4         | 10     |
| Разрывная нагрузка                  | Н                 | 6428      | 5647   |
| Удлинение при разрывной нагрузке    | мм                | 21,01     | 20,411 |
| Максимальная нагрузка               | Н                 | 11274     | 10889  |
| Удлинение при максимальной нагрузке | мм                | 13,593    | 13,049 |

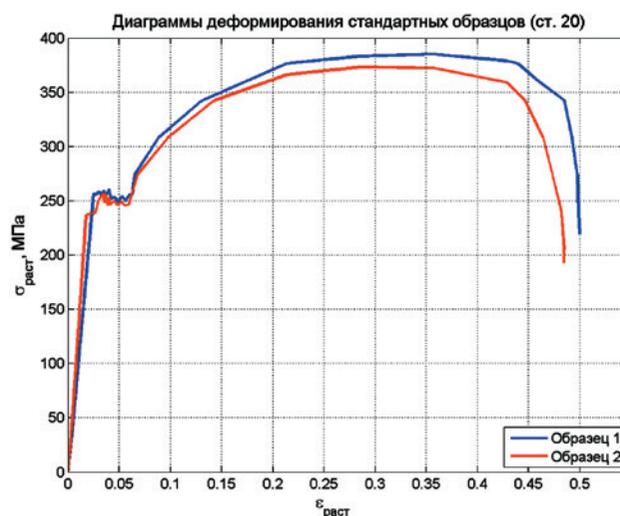


Рис. 3. Диаграммы деформирования стандартных образцов

Табл. 3. Основные характеристики диаграмм деформирования

| Параметр                              | Единицы измерения | Значение  |        |
|---------------------------------------|-------------------|-----------|--------|
|                                       |                   | № образца |        |
|                                       |                   | 1         | 2      |
| Условный предел текучести             | МПа               | 281,95    | 276,27 |
| Временное сопротивление               | МПа               | 385,77    | 372,6  |
| Истинное сопротивление разрыву        | МПа               | 799,26    | 702,15 |
| Относительное удлинение после разрыва | %                 | 41,67     | 40,24  |
| Относительное сужение после разрыва   | %                 | 72,48     | 72,48  |

<sup>1</sup> ГОСТ 1497 84 (ИСО 6892 84) Металлы. Методы испытаний на растяжение.

Площади сечения образцов, мм<sup>2</sup>:

- до испытания ( $A_0$ ):

$$A_{01} = A_{02} = \frac{\pi d_{01}^2}{4} = 29,21;$$

- после разрыва ( $A_*$ ):

$$A_{*1} = A_{*2} = \frac{\pi d_{*1}^2}{4} = 8,04.$$

Диаграммы деформирования представлены на рис. 3, их основные характеристики сведены в табл. 3.

### 3.2. Двукратное нагружение

Для испытаний на двукратное растяжение было изготовлено 40 цилиндрических образцов специального типа, эскиз которых представлен на рис. 4.

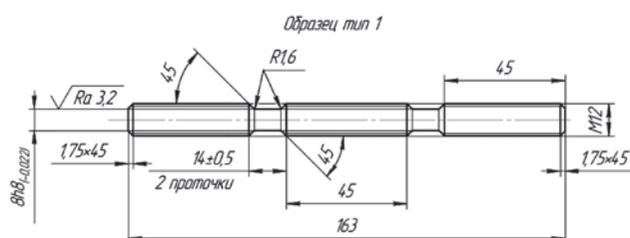


Рис. 4. Образец для испытаний на двукратное нагружение

Испытания проводились в следующем порядке:

- 1) замер штангенциркулем диаметра рабочей части (проточки) образцов с занесением в протокол испытаний;
- 2) закрепление образца в захватах электромеханической испытательной машины ИР 5047-50, создание незначительного натяжения и настройка силоизмерительного устройства на нулевую нагрузку, настройка скорости нагружения (20 мм/мин);
- 3) нагружение образца до разрыва по одной из проточек;

Табл. 4. Экспериментальные значения отношения максимальных усилий при первом ( $F_1$ ) и втором ( $F_2$ ) нагружении

| № образца | Отношение $F_1/F_2$ | № образца | Отношение $F_1/F_2$ | № образца | Отношение $F_1/F_2$ |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| 1         | 0,968               | 15        | 1,007               | 29        | 0,990               |
| 2         | 0,980               | 16        | 1,007               | 30        | 0,969               |
| 3         | 1,021               | 17        | 1,009               | 31        | 1,007               |
| 4         | 0,991               | 18        | 1,008               | 32        | 0,992               |
| 5         | 1,017               | 19        | 1,053               | 33        | 1,005               |
| 6         | 1,005               | 20        | 0,925               | 34        | 1,023               |
| 7         | 1,011               | 21        | 0,955               | 35        | 1,008               |
| 8         | 0,997               | 22        | 1,041               | 36        | 0,996               |
| 9         | 1,011               | 23        | 0,985               | 37        | 0,941               |
| 10        | 0,963               | 24        | 0,985               | 38        | 1,006               |
| 11        | 0,967               | 25        | 1,015               | 39        | 0,981               |
| 12        | 0,928               | 26        | 0,982               | 40        | 1,002               |
| 13        | 1,030               | 27        | 0,932               | –         | –                   |
| 14        | 1,005               | 28        | 1,008               | –         | –                   |

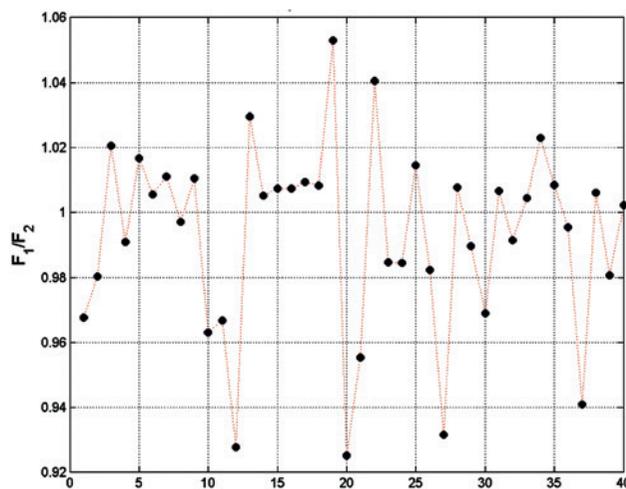


Рис. 5. Выборка значений отношения  $F_1/F_2$

4) снятие с отображаемой диаграммы растяжения значений максимального усилия и усилия разрушения.

Далее две части образца соединяют в месте разрыва при помощи гайки и повторяют пп. 2-4 до разрыва по второй проточке.

Полученные экспериментальные значения отношения максимальных усилий при первом ( $F_1$ ) и втором ( $F_2$ ) нагружении представлены в табл. 4 и на рис. 5.

### 3.3. Многократное нагружение

Для испытаний на многократное растяжение, включающее 5 циклов, было изготовлено 10 цилиндрических образцов специального типа, эскиз которых представлен на рис. 6.

Алгоритм испытаний аналогичен алгоритму испытаний на двукратное нагружение, за исключением того, что пп. 2-4 повторяются до тех пор, пока не произойдет разрыва по всем проточкам.

Внешний вид испытательной машины в процессе проведения эксперимента, в том числе при растяжении и разрыве и образца представлен на рис. 7.

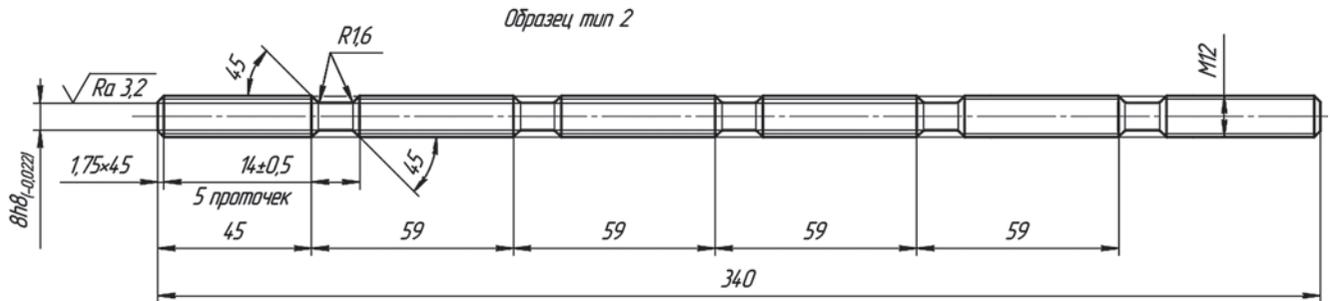


Рис. 6. Образец для испытаний на многократное нагружение

Вычисленные по экспериментальным данным значения отношения максимальных усилий при первом и последующем нагружениях представлены на рис. 8.

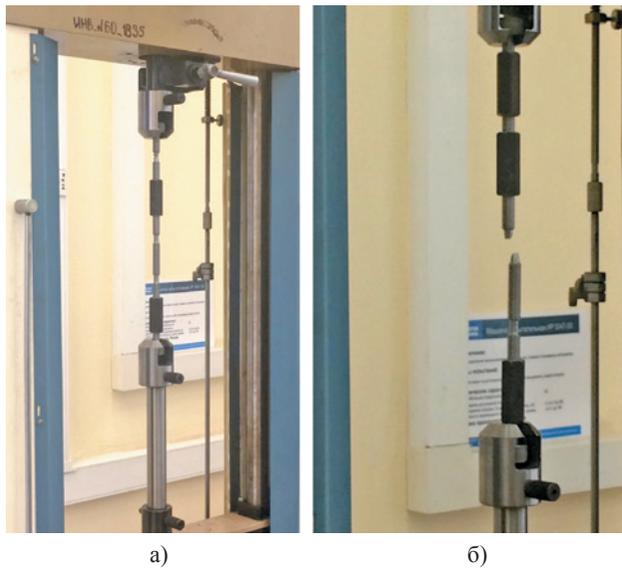


Рис. 7. Внешний вид испытательной машины в процессе проведения эксперимента:

а) – растяжение образца; б) – разрыв образца

## 4. Статистическая обработка результатов

### 4.1. Двукратное нагружение

Исследования прочности 40 стальных образцов на разрыв образуют совокупность независимых и равнозначных измерений случайной величины (далее – СВ) максимального усилия  $X$ , кН.

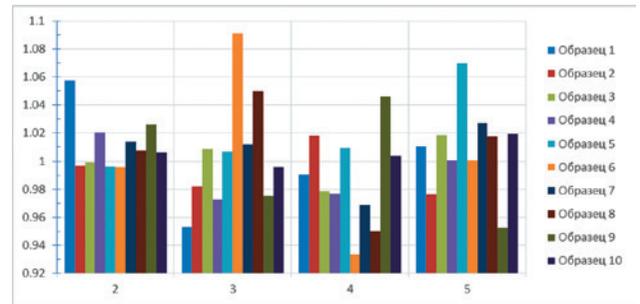
По формуле Стерджесса [11] оптимальное количество интервалов, на которые разбивается наблюдаемый диапазон изменения случайной величины при построении гистограммы плотности ее распределения:

$$n = 1 + \log_2 N \approx 6,$$

где  $N = 40$  – общее количество наблюдений случайной величины.

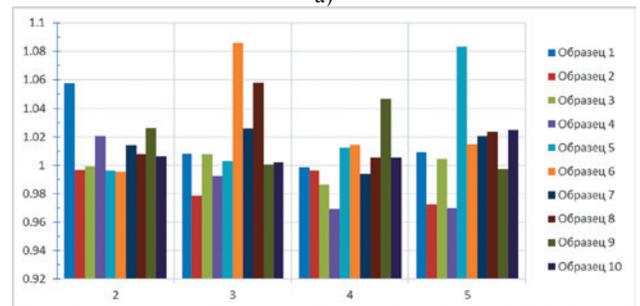
Табл. 4. Количество данных в каждом интервале

| Интервалы     | [0,9252; 0,9465) | [0,9465; 0,9678) | [0,9678; 0,9891) | [0,9891; 1,0104) | [1,0104; 1,0317) | [1,0317; 1,0530) |
|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Частота $m_i$ | 4                | 4                | 6                | 17               | 7                | 2                |



номер нагружения

а)



номер нагружения

б)

Рис. 8. Выборка значений отношения максимальных усилий  
а) Отношения значений максимальных усилий предыдущего нагружения к текущему;

б) Отношения значения максимальных усилий первого нагружения к текущему

На рис. 9 изображены гистограмма и полигон относительных частот.

Значения эмпирической функции распределения выписаны в последней строке статистического ряда распределения относительных частот табл. 6. Значения эмпирической функции распределения в аналитическом виде:

$$F'(x) = \begin{cases} 0,1, & \text{если } 0,9252 \leq x < 0,9465; \\ 0,2, & \text{если } 0,9465 \leq x < 0,9678; \\ 0,35, & \text{если } 0,9678 \leq x < 0,9891; \\ 0,775, & \text{если } 0,9891 \leq x < 1,0104; \\ 0,95, & \text{если } 1,0104 \leq x < 1,0317; \\ 1, & \text{если } 1,0317 \leq x < 1,0530. \end{cases}$$

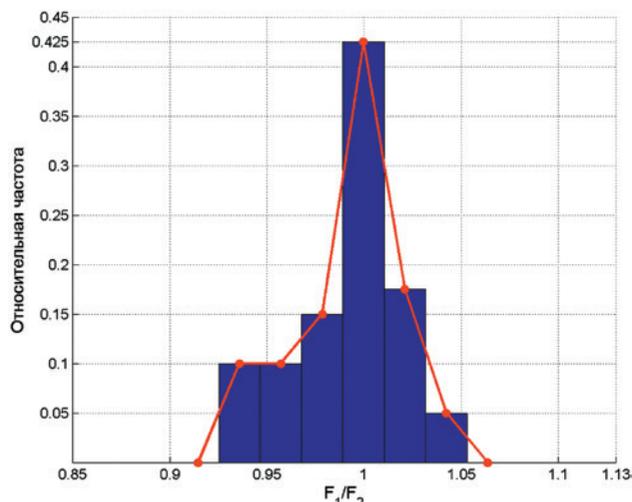


Рис. 9. Гистограмма и полигон распределения относительных частот отношения  $F_1/F_2$

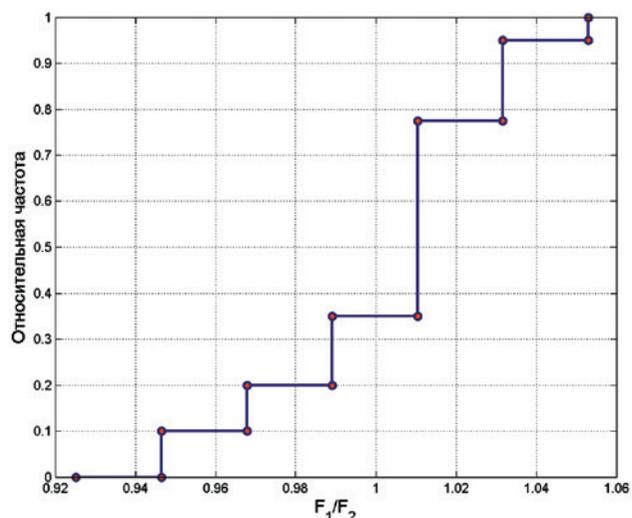


Рис. 10. Эмпирическая функция распределения отношения  $F_1/F_2$

График эмпирической функции изображен на рис. 10. В тех случаях, когда объем выборки достаточно велик ( $N > 25$ ), прежде всего целесообразно найти математическое ожидание ( $\bar{x}$ ):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i m_i,$$

а затем перейти к вычислению центральных моментов порядка  $k$  ( $k = 2, 3, 4$ ). Полученные значения сведены в табл. 6.

Выборочное среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2 m_i}{N} = 0,0276,$$

коэффициент асимметрии ( $A$ ):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^3 m_i}{N\sigma^2} = -0,0143,$$

коэффициент эксцесса ( $E$ ):

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^4 m_i}{N\sigma^4} - 3 = 2,7116.$$

Среднеквадратичные отклонения коэффициентов асимметрии ( $A_s$ ) и эксцесса ( $E_s$ ):

$$A_s = 3 \cdot \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}} = 1,0930,$$

$$E_s = 5 \cdot \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}} = 3,2209,$$

Критерием нормальности распределения является выполнение неравенств:

$$|A| \leq A_s, \quad |E| \leq E_s.$$

Из приведенных расчетов видно, что выборочные коэффициенты асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  удовлетво-

Табл. 5. Частота попадания в каждый интервал

|                                   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Интервалы                         | [0,9252; 0,9465) | [0,9465; 0,9678) | [0,9678; 0,9891) | [0,9891; 1,0104) | [1,0104; 1,0317) | [1,0317; 1,0530) |
| Относительная частота $m/n$       | 0,1              | 0,1              | 0,15             | 0,425            | 0,175            | 0,05             |
| Накопленная относительная частота | 0,1              | 0,2              | 0,35             | 0,775            | 0,95             | 1,0              |

Табл. 6. Расчет параметров распределения

| Интервалы наблюдаемых значений СВ $X$ | Средины интервалов $X_i$ | Частоты | $(X_i - \bar{x})m_i$    | $(X_i - \bar{x})^2 m_i$ | $(X_i - \bar{x})^3 m_i$ | $(X_i - \bar{x})^4 m_i$ |
|---------------------------------------|--------------------------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| [0,9252; 0,9465)                      | 0,9359                   | 4       | -0,2236                 | 0,0125                  | $-6,9894 \cdot 10^{-4}$ | $3,9075 \cdot 10^{-5}$  |
| [0,9465; 0,9678)                      | 0,9572                   | 4       | -0,1384                 | 0,0048                  | $-1,6581 \cdot 10^{-4}$ | $5,7385 \cdot 10^{-6}$  |
| [0,9678; 0,9891)                      | 0,9785                   | 6       | -0,0799                 | 0,0011                  | $-1,4151 \cdot 10^{-5}$ | $1,8836 \cdot 10^{-7}$  |
| [0,9891; 1,0104)                      | 0,9998                   | 17      | 0,1358                  | 0,0011                  | $8,6604 \cdot 10^{-6}$  | $6,9167 \cdot 10^{-8}$  |
| [1,0104; 1,0317)                      | 1,0211                   | 7       | 0,2050                  | 0,0060                  | $1,7579 \cdot 10^{-4}$  | $5,1479 \cdot 10^{-6}$  |
| [1,0317; 1,0530)                      | 1,0424                   | 2       | 0,1012                  | 0,0051                  | $2,5883 \cdot 10^{-4}$  | $1,3092 \cdot 10^{-5}$  |
| Итого:                                |                          | 40      | $7,1054 \cdot 10^{-15}$ | 0,0306                  | $-4,3562 \cdot 10^{-4}$ | $6,3311 \cdot 10^{-5}$  |

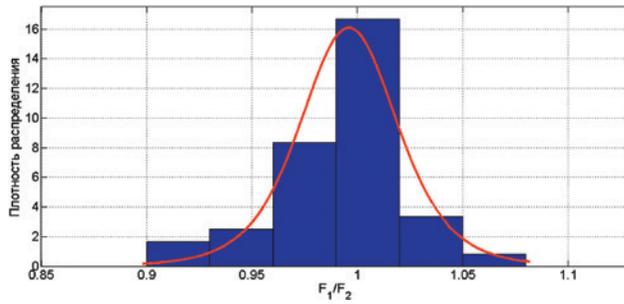


Рис. 11. Плотность распределения  $F_1/F_2$

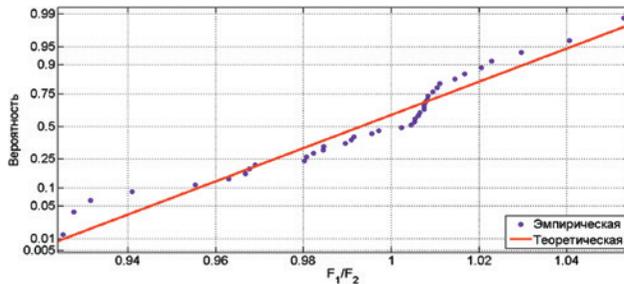
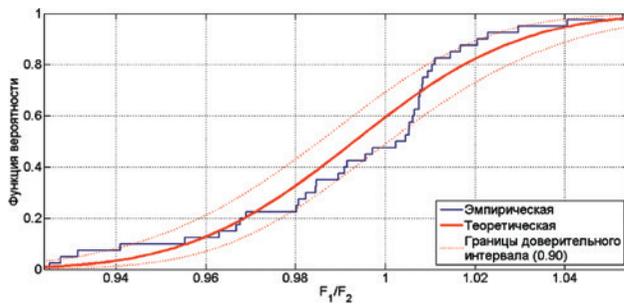
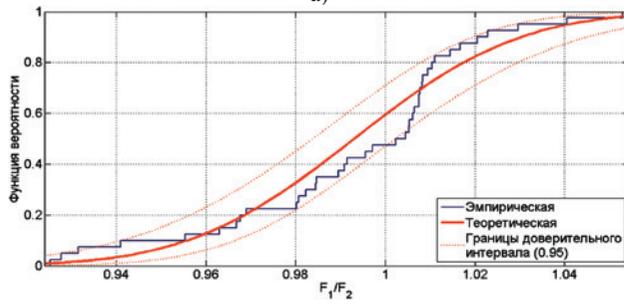


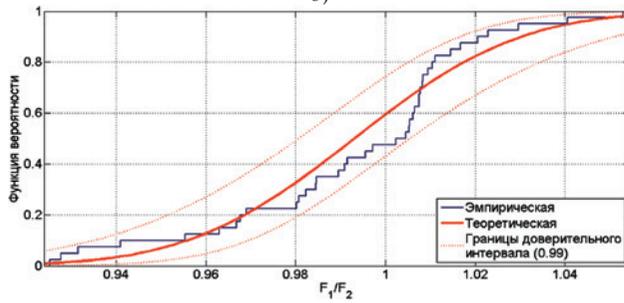
Рис. 12. График сравнения распределения эмпирической и теоретической вероятности



а)



б)



в)

Рис. 13. График сравнения эмпирической функции вероятности для выборки с теоретическим распределением (доверительная вероятность: а –  $\alpha=0,90$ , б –  $\alpha=0,95$ , в –  $\alpha=0,99$ )

ряют неравенствам, что соответствует нормальному распределению. Вид полигона и гистограммы относительных частот также напоминает нормальную кривую (кривую Гаусса).

Исходя из «технологии» образования СВ  $X$ , т.е. механизма образования отклонений значений максимальных усилий от некоторого номинального значения, можно предположить, что распределение отношения  $F_1/F_2$  является нормальным.

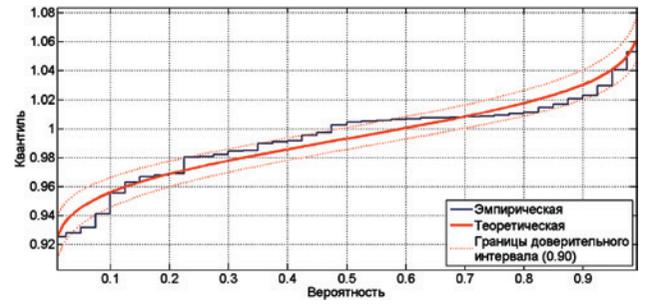
Плотность вероятности нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$

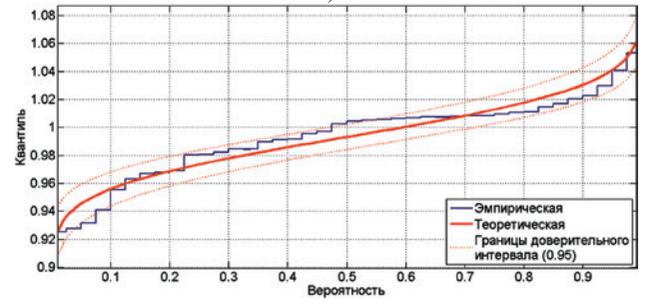
Найдем точечные оценки параметров  $\bar{x}$  и  $\pi$  нормального распределения методом моментов:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i m_i = 0,9918,$$

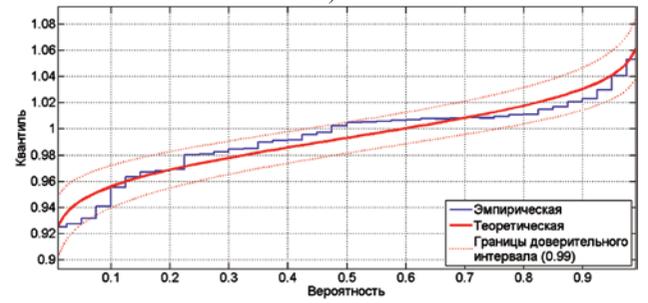
$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2 m_i}{N} = 0,0276.$$



а)



б)



в)

Рис. 14. График сравнения эмпирической квантили распределения с теоретическим распределением (доверительная вероятность: а –  $\alpha=0,90$ , б –  $\alpha=0,95$ , в –  $\alpha=0,99$ )

Следовательно, плотность вероятности предполагаемого нормального распределения имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{0,0276 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0,9918)^2}{2 \cdot 0,0276^2}}$$

## Выводы

Назначение оптимальных коэффициентов запаса при испытаниях на прочность стальных магистральных трубопроводов является важнейшим аспектом, обуславливающим надежность их эксплуатации. Эти величины напрямую связаны с проектными параметрами трубопроводов и методиками определения их несущей способности. Однако текущие значения коэффициентов основаны на опыте середины XX-го века и не пересматривались много лет, несмотря на развитие техники строительства трубопроводов и технологии производства труб.

В рамках проведенной работы была отработана методика экспериментального исследования на двукратное и многократное растяжение стержневых образцов специальной формы, изготовленных из трубной стали. Полученные результаты подтвердили корректность используемого в настоящее время подхода к выбору коэффициентов запаса при испытаниях на прочность магистральных трубопроводов.

Испытательный арсенал исследователей пополнился методическим инструментом, позволяющим если не заменить, то на первых порах подкреплять результаты дорогостоящих и трудоемких полномасштабных экспериментов на реальных трубопроводах. В частности, многократное нагружение образцов может использоваться для имитации многоэтапных испытаний трубопроводов на участках повышенной категории.

Важно также учитывать влияние таких факторов, как природа трубного материала и температурные условия испытаний и последующей работы трубопровода. Исходя из этого, в развитие описанного в настоящей статье эксперимента и с целью наработки достаточной эмпирической базы, планируется разработать соответствующую методику и провести аналогичные испытания образцов, изготовленных из разных материалов, а также при различных температурах первого и второго нагружений.

В современных реалиях внедрения трубных материалов нового поколения, в том числе различных цветных металлов и композитных материалов, использование методики позволит усовершенствовать подход к оценке их промышленной применимости и к назначению параметров испытаний трубопроводов на прочность.

## Библиографический список

1. Мир-Бабаев М.Ф. Трубопроводный транспорт в бакинском нефтяном деле (к 115-летию начала строительства уникального трубопровода Баку-Батум) // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2012. № 1. С. 73-79.

2. The Big Inch and Little Big Inch pipelines: the most amazing government-industry cooperation ever achieved. Texas Eastern Transmission Corporation, May 2000.

3. Technical, operational, practical, and safety considerations of hydrostatic pressure testing existing pipelines. Interstate Natural Gas Association of America Foundation final report No. 2013.03.

4. Gray J.S. Retesting pipeline justifies higher allowable discharge pressures // Oil & Gas Journal. Vol. 63. No. 38. P. 122.

5. Kiefner J.F., Maxey W.A. Pressure ratios key to effectiveness; in-line inspection complements // Oil & Gas Journal. Vol. 98. No. 31. Pp. 54-61.

6. Галиуллин З.Т., Карпов С.В., Королев М.И. и др. Переиспытание и комплексное обследование магистральных газопроводов, подверженных стресс-коррозии // Научно-технический сборник «Транспорт и подземное хранение газа». М.: ИРЦ Газпром, 1996. 35 с.

7. Brooks L.E. High-Pressure Testing – Pipeline Defect Behavior and Pressure Reversals. ASME, 68-PET-24, 1968.

8. Курганова М.А., Нефедов С.В., Носова Е.С. и др. Сравнительный анализ методик расчета несущей способности магистральных газопроводов по различным нормам и стандартам // Наука и техника в газовой промышленности. 2012. № 4(52). С. 5-19.

9. Hopkins P. High design factor pipelines: integrity issues // The Journal of Pipeline Integrity. 2005. № 2. Pp. 69-97.

10. Маянц Ю.А. Совершенствование методов испытаний магистральных нефтегазопроводов в северных условиях: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19: защищена 11.02.2015 / Маянц Юрий Анатольевич. М., 2015. 142 с. Москва, 2014. – 142 с.

11. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

## References

1. Mir-Babayev M.F. Pipeline transportation in the Baku oil industry (dedicated to the 115th anniversary of commencing the construction of unique pipeline Baku-Batum). Azerbaijan Oil Industry 2012;1:63-69.

2. The Big Inch and Little Big Inch pipelines: the most amazing government-industry cooperation ever achieved. Texas Eastern Transmission Corporation; May 2000.

3. Technical, operational, practical, and safety considerations of hydrostatic pressure testing existing pipelines. Interstate Natural Gas Association of America Foundation final report No. 2013.03.

4. Gray J.S. Retesting pipeline justifies higher allowable discharge pressures. Oil & Gas Journal;63(38);122.

5. Kiefner J.F., Maxey W.A. Pressure ratios key to effectiveness; in-line inspection complements. Oil & Gas Journal;98(31):54-61.

6. Galiullin Z.T., Karpov S.V., Korolev M.I. et al. Retesting and comprehensive inspection of main gas pipelines

subject to stress corrosion. In: Collected Science and Engineering Papers Transmission and Underground Storage of Gas. Moscow: IRC Gazprom; 1996. (in Russ.)

7. Brooks L.E. High-Pressure Testing – Pipeline Defect Behavior and Pressure Reversals. ASME, 68-PET-24; 1968.

8. Kurganova M.A., Nefedov S.V., Nosova E.S. et al. [A comparative analysis of methods for calculating the bearing capacity of main gas pipelines according to various norms and standards]. Science and Technology in the Gas Industry 2012;4(52):5-19. (in Russ.)

9. Hopkins P. High design factor pipelines: integrity issues. The Journal of Pipeline Integrity 2005;2:69-97.

10. Mayants Yu.A. [Improving the testing methods for main oil and gas pipelines in northern conditions: a Candidate of Engineering dissertation: 25.00.19: defended on 02.11.2015]. Moscow; 2015. (in Russ.)

11. Stepnov M.N. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]. Moscow: Mashinostroenie; 1985. (in Russ.)

## Сведения об авторах

**Маянц Юрий Анатольевич** – кандидат технических наук, начальник Корпоративного научно-технического центра технологий строительства, эксплуатации и ремонта ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Y\_Mayants@vniigaz.gazprom.ru

**Ширяпов Дмитрий Игоревич** – кандидат технических наук, начальник Лаборатории методического обеспечения предпусковых и пусковых операций Корпоративного научно-технического центра технологий строительства, эксплуатации и ремонта ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Российская Федерация; председатель подкомитета «Системы трубопроводного транспорта» технического комитета «Нефтяная и газовая промышленность, включая низкоуглеродную энергетику» международной организации по стандартизации ISO, e-mail: D\_Shiryapov@vniigaz.gazprom.ru

**Носова Екатерина Сергеевна** – старший научный сотрудник Лаборатории материалов и изделий для строительства и ремонта трубопроводов Корпоративного научно-технического центра технологий строительства, эксплуатации и ремонта ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: E\_Nosova@vniigaz.gazprom.ru

## About the authors

**Yury A. Mayants**, Candidate of Engineering, Head of Corporate Scientific and Technical Center of Construction, Operation and Repair Technologies, Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: Y\_Mayants@vniigaz.gazprom.ru

**Dmitry I. Shiryapov**, Candidate of Engineering, Head of Laboratory for Pipeline Pre-commissioning, Corporate Scientific and Technical Center of Construction, Operation and Repair Technologies, Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; Chairman of the Subcommittee "Pipeline Transportation Systems" of the Technical Committee "Oil and gas industries including lower carbon energy" of the International Organization for Standardization ISO, e-mail: D\_Shiryapov@vniigaz.gazprom.ru

**Ekaterina S. Nosova**, Senior Researcher, Laboratory of Materials and Products for Pipelines Construction and Repair, Corporate Scientific and Technical Center of Construction, Operation and Repair Technologies, Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: E\_Nosova@vniigaz.gazprom.ru

## Вклад авторов

**Маянцем Ю.А.** предложена идея и концепция проведения исследования, разработана методика эксперимента на двукратное и многократное растяжение, подготовлена конструкторская документация на изготовление стержневых образцов специальной формы.

**Ширяповым Д.И.** выполнен ретроспективный обзор отечественных и зарубежных требований нормативных документов, регламентирующих требования к испытаниям на прочность трубопроводов, проанализированы предпосылки к действующим в настоящее время параметрам испытаний, сформулированы выводы по результатам работы.

**Носовой Е.С.** проведены испытания на растяжение стандартных цилиндрических образцов, построены диаграммы деформирования, проведены испытания на двукратное и многократное растяжение цилиндрических образцов специального типа, выполнена статистическая обработка экспериментальных данных.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Комплексная безопасность АСУ ТП объектов КИИ железнодорожного транспорта

## Integrated Safety of ACS of Railway CII Facilities

Попов П.А.<sup>1</sup>, Розенберг Е.Н.<sup>1</sup>, Сабанов А.Г.<sup>1\*</sup>, Шубинский И.Б.<sup>1</sup>  
Popov P.A.<sup>1</sup>, Rozenberg E.N.<sup>1</sup>, Sabanov A.G.<sup>1\*</sup>, Shubinsky I.B.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИАС», Москва, Россия

<sup>1</sup>JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation

\*a.sabanov@vniias.ru



Попов П.А.



Розенберг Е.Н.



Сабанов А.Г.



Шубинский И.Б.

**Резюме.** Приводится анализ системы стандартов по безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами железнодорожного транспорта, включающий основные тенденции развития стандартизации на ближайшую перспективу. Рассматриваются теоретические вопросы обеспечения функциональной безопасности, в том числе концепция безопасности зоны управления перевозочным процессом низового уровня и основные принципы обеспечения безопасности.

**Abstract.** The paper analyses the system of standards related to the safety of railway automated process control systems, including the key trends of standardisation for the near future. The authors examine theoretical matters of functional safety, including the safety concept of the bottom-layer transportation management process and the basic safety principles.

**Ключевые слова:** комплексная безопасность, функциональная безопасность, стандарты, автоматизированные системы управления технологическими процессами железнодорожного транспорта, информационная безопасность.

**Keywords:** integrated safety, functional safety, standards, automated railway transportation processes management systems, information security.

**Для цитирования:** Попов П.А., Розенберг Е.Н., Сабанов А.Г., Шубинский И.Б. Комплексная безопасность АСУ ТП объектов КИИ железнодорожного транспорта // Надежность. 2024. №4. С. 48-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57>

**For citation:** Popov P.A., Rozenberg E.N., Sabanov A.G., Shubinsky I.B. Integrated Safety of ACS of Railway CII Facilities. Dependability 2024;4:48-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57>

**Поступила:** 11.07.2024 / **После доработки:** 27.08.2024 / **К печати:** 18.11.2024

**Received on:** 11.07.2024 / **Revised on:** 27.08.2024 / **For printing:** 18.11.2024

### Введение

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

- низового уровня;
- среднего (промежуточного) уровня;
- верхнего уровня.

За последние 25 лет опубликовано свыше 50 стандартов [1–55], включающих требования к системам

управления, системам обеспечения безопасности и их элементам, а также принципы обеспечения их безопасности. Тем не менее, процесс разработки стандартов продолжается в настоящее время, в качестве примера можно привести стандарт [55], в котором разработаны требования функциональной безопасности (ФБ) и информационной безопасности (ИБ) к программному обеспечению (ПО) АСУ ТП ЖТ. Одновременный учет требований ФБ и ИБ в конкретной АСУ ТП ЖТ зачастую вызывает столкновение интересов специалистов обоих направлений обеспечения безопасности, хотя приоритет выполнения требований ФБ не оспаривается. В данной работе соотношению требований ФБ на основе действующих стандартов и требований ИБ как объектов КИИ уделяется повышенное внимание.

В настоящее время в ОАО «РЖД» планируется разработка как минимум, еще одного корпоративного стандарта, включающего в себя одновременно требования ФБ и ИБ к ПО АСУ ТП ЖТ. За прошедшие 10 лет с момента публикации стандарта [28], существенно изменилась нормативно-правовая база в части ИБ, что

обусловило необходимость разработки ряда стандартов, согласованных с современным состоянием технологий и нормативных актов регуляторов. В связи с вышеизложенным, задачи данной работы по рассмотрению и анализу проблем обеспечения безопасности систем различного уровня управления и связанных с обеспечением комплексной безопасности стандартов [1–55] представляются актуальными. Данная статья концентрируется на рассмотрении проблем обеспечения ФБ и ИБ для систем низового уровня управления перевозочным процессом.

## 1. Краткий анализ системы стандартов по ФБ

В рассмотрении истории развития стандартов по ФБ ограничимся периодом примерно в четверть века, поскольку предметом исследования являются действующие стандарты и их взаимное влияние, а стандарты, как правило, пересматриваются каждые 5 лет в международной организации по стандартизации (ИСО) и не более, чем каждые 10 лет, в других организациях.

Сначала кратко рассмотрим стандарты, созданные к началу XXI века. Как отмечено в работе [56], существенное влияние на развитие действующих специализированных систем стандартов по ФБ для систем управления движением железнодорожного транспорта (ЖТ) оказал выход в середине 1990-х годов серии стандартов [2–5]. Разработанные CENELEC (аббревиатура французского наименования Европейского комитета электротехнической стандартизации, отвечающего за европейские стандарты в области электротехники – Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) стандарты [2–5] стали обязательными после выхода директив Европейского Союза № 93/38/ЕЕС и № 2001/95/ЕС.

Появление указанных стандартов по времени почти совпало с появлением международного стандарта МЭК 61508 в семи частях. Первый выпуск этого стандарта публиковался в 1998 и 2000 годах, второй выпуск был опубликован в 2010 г. [18–23, 46]. Этот стандарт носит общий характер и может применяться для задач ФБ в любых отраслях.

Стандарт базируется на двух фундаментальных принципах:

1) инженерный процесс, называемый жизненным циклом безопасности, определяется на основе передовой практики с целью выявления и устранения проектных ошибок и упущений;

2) вероятностный подход к отказам для учета влияния отказов устройств на безопасность.

В целом некоторые положения стандартов CENELEC можно представить в виде адаптации различных частей стандарта МЭК 61508 для железнодорожного транспорта, хотя между ними имеются и существенные отличия. В частности, в отличие от стандартов [2–5], в МЭК 61508 была недостаточно представлена структура доказательства соответствия требованиям безопасности (Safety Case). Вторым отличием является разный подход

к формированию набора показателей управления RAMS (надежности, оперативной готовности, пригодности к техническому обслуживанию и безопасности). Более полный набор требований безопасности в стандартах CENELEC может объясниться тем, что у МЭК концепция RAMS развивалась почти одновременно в двух стандартах, состоящих из нескольких частей – 61508 и 60300, а стандарты CENELEC вобрала в себя значительный опыт обеспечения безопасности железнодорожного транспорта Германии и США.

Из стандартов, опубликованных до 2000 года, можно выделить еще работу [49], разработанную рабочей группой IEEE «Проверка жизненно важных функций в процессорных системах, используемых для управления железнодорожным транспортом» (P1483). Это стандарт для верификации жизненно важных функций в процессорных системах, применяемых для управления на железнодорожном транспорте, в котором рассмотрен ряд задач верификации процессорного оборудования, используемого в критически важных с точки зрения безопасности приложениях в железнодорожных и транзитных системах. В стандарте также рассмотрены процессы проверки уровня безопасности, достигнутого при реализации критически важных для безопасности отказоустойчивых функций.

Опубликование стандартов с 2000 года по время написания данной работы, можно условно разделить на три этапа:

- первый этап – с 2000 г. по 2012 г.;
- второй этап – с 2013 г. по 2017 г.;
- третий этап – с 2018 г. по настоящее время.

**Первый** этап характеризуется появлением базовых международных стандартов и разработки с учетом их анализа основополагающих российских стандартов, на основе которых в последующем строились стандарты по ФБ. Среди базовых международных стандартов следует выделить уже упомянутые стандарты CENELEC [2–5, 14, 17] и семь частей ГОСТ 61508 по функциональной безопасности систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью [18–23, 46]. Кроме этого, именно на первом этапе в системе национальных стандартов появились базовые стандарты системы ГОСТ Р 54хх, в том числе стандарт по управлению рисками на железнодорожном транспорте [15]. Этот стандарт был разработан не только на основе анализа мирового опыта, но и с использованием российских наработок. В это же время на основе Технических регламентов Таможенного союза (в частности, регламента «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта») и РД для железнодорожного транспорта были разработаны стандарты, содержащие требования безопасности и методы контроля для систем железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях [24] и переездах [25], а также для систем диспетчерской централизации и диспетчерского контроля движения поездов [26] и поездов на перегонах железнодорожных линий [27].

Несмотря на его небольшую продолжительность, **второй** этап условно можно назвать становлением не только отечественной, но и межгосударственной систем стандартов по функциональной безопасности автоматизированных систем технологических процессов железнодорожного транспорта и перевозочного процесса. Главным событием данного этапа стал выход серии межгосударственных стандартов ГОСТ 33хх по функциональной безопасности. В эту серию вошли стандарты по доказательству безопасности объектов железнодорожного транспорта [30], управлению рисками [32], системам железнодорожной автоматики и телемеханики на сортировочных станциях [37], железнодорожных переездах [38], железнодорожных станциях [39], перегонах [41], системах диспетчерской централизации и диспетчерского контроля [42]. Эта серия стандартов была создана на основе разработанной в 2012 году серии ГОСТ Р 54хх. Знаковыми для развития требований и методов оценки функциональной безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами и техническими средствами железнодорожного транспорта явились стандарты ОАО «РЖД» [28, 34], а также национальные стандарты по требованиям к автоматизированным системам в защищенном исполнении [29], требованиям к ПО на тяговом подвижном составе [35].

**Третий** этап развития стандартов по функциональной безопасности продолжается в настоящее время. Его можно охарактеризовать как этап совершенствования системы стандартов и развития специализированных решений, хотя имеются и не до конца решенные вопросы, одним из которых является соотношение функциональной и информационной безопасности для автоматизированных систем управления технологическими процессами железнодорожного транспорта. Одной из задач совершенствования является апгрейд стандартов в связи с существенным обновлением нормативно-правовой базы и накоплением практического опыта. Примерами публикации специализированных документов являются: стандарт по обеспечению безопасности передачи информации [44], стандарт по системам интервального регулирования движения поездов на высокоскоростных линиях [47], стандарт по требованиям к интерфейсам и протоколам обмена информацией [50], стандарт по безопасности приложений [52]. В качестве одного из подходов к решению задачи разделения ролей и соотношения предметных областей функциональной и информационной безопасности в обеспечении задач безопасности движения можно рекомендовать стандарт [53].

## 2. Концепция безопасности зоны управления перевозочным процессом низового уровня

Низовый уровень управления перевозочным процессом реализуется с помощью систем железнодорожной автоматики и телемеханики, систем электроснабжения,

связи и передачи данных, а также средств управления подвижным составом. Все эти средства управления представляют собой разветвленные программно-аппаратные устройства, в которых большинство функций контроля и управления безопасностью возлагается на программное обеспечение. Безусловным приоритетом обеспечения безопасности средств управления низового уровня являются задачи реализации функциональной безопасности. Они сочетаются с задачами обеспечения безопасности информации, которые входят составной частью в задачи обеспечения функциональной безопасности.

**В основу функциональной безопасности** автоматизированных систем управления перевозочным процессом низового уровня должны быть положены следующие физические и технические принципы.

**Физические принципы** проектирования функционально безопасных систем управления базируются на законе сохранения энергии (первый закон термодинамики) и на законе роста энтропии (второй закон термодинамики). Закон сохранения энергии гласит, что энергия не исчезает, а может лишь менять свою форму. Ущерб людям, материальным ценностям или окружающей среде всегда сопровождается преобразованием энергии из одной формы в другую, т.е. работой. Когда энергия преобразуется из одной формы в другую, ее часть может превратиться в такую форму, которая нанесет вред. Чтобы предотвратить в системе управления преобразование энергии в нежелательную форму, рекомендуются следующие базовые правила:

1) отказ системы должен приводить ее в состояние с минимальным энергетическим потенциалом. Такое состояние должно быть защитным (безопасным);

2) проектировать относящиеся к безопасности функции системы следует таким образом, чтобы система использовала минимально возможное количество энергии.

Второй закон термодинамики гласит, что в замкнутой системе энтропия никогда не убывает. Поэтому желательно удерживать энтропию на низком уровне с тем, чтобы число состояний системы было невелико. Рекомендованы следующие правила обеспечения безопасности:

- система должна быть простой. Только в таком случае будет небольшое число состояний и минимальная энтропия. Также понятно, что простая система проще в проектировании, разработке и управлении;
- инструкции должны быть ясными и понятными;
- не допускать потерю информации.

**Технические принципы функциональной безопасности.** К ним относятся:

- принцип избыточности;
- принцип отказоустойчивости;
- принцип отказобезопасности.

**Принцип избыточности** предполагает, что для обеспечения функциональной безопасности систем железнодорожного транспорта предусматривается введение в создаваемые элементы, узлы, устройства и системы

дополнительные средства сверх минимально необходимых. Этот комплексный принцип включает в себя ряд составляющих принципов:

- применение резервирования и избыточных средств;
- безопасный ресурс;
- применение разнообразных способов обеспечения безопасности;
- применение средств, локализирующих развитие неблагоприятных событий.

Разнообразие характеризует ситуацию, где несколько подсистем выполняют одну и ту же функцию различным способом. Разнообразие может быть относительно процесса разработки, алгоритма, программного обеспечения, аппаратных средств и т.д. Основное назначение принципа разнообразия состоит в том, чтобы исключить отказы по общим причинам в максимально возможной степени, так как они приводят к опасному отказу системы.

Обеспечение безопасности возможно за счет применения средств, локализирующих развитие неблагоприятных процессов. Эти средства защищают систему от выдачи неправильных воздействий, предупреждают о возможном наступлении экстремальных ситуаций и управляют функционированием объекта в критических случаях (парируют развитие отказа и переводят объекты управления в защитное состояние).

*Принцип отказоустойчивости* предназначен для сохранения возможности системы управления сохранять свою работоспособность после отказа одного или нескольких составных компонентов. Здесь речь идет об аппаратной отказоустойчивости. Программная отказоустойчивость имеет место тогда, когда система имеет возможность сохранять работоспособность после появления при определенном наборе входных данных одной или нескольких скрытых программных ошибок. Этот принцип основывается на избыточности средств системы.

*Отказобезопасность* – способность системы управления сохранять безопасное состояние и (или) обеспечивать безопасность управления подчиненными объектами в случае отказов самой системы или ее составных частей, а также в случае негативного внешнего информационного воздействия. Этот принцип предназначен для управления опасными отказами. Он определяет способность системы управления совместно с объектом управления оставаться в безопасном состоянии или переходить в безопасное состояние в случае возникновения отказа.

Согласно стандартам [30–34, 37–42] и др., в которых сосредоточены принципы и практические способы обеспечения функциональной безопасности систем управления, принцип отказобезопасности определяется как «выйти из работы безопасным образом или выйти из работы без опасных последствий». Заметим, что в этих стандартах установлено требование обеспечения допустимой (заданной) интенсивности опасных отказов даже при наличии в системе управления совместно с объектом управления одного случайного отказа.

Этот принцип может быть реализован тремя различными способами:

- свойственная системе отказобезопасность;
- реактивная отказобезопасность;
- составная или комбинированная отказобезопасность.

Система разрабатывается согласно *свойственному системе принципу отказобезопасности*, если все возможные режимы ее работы при возникновении отказа не приводят к опасным последствиям. Отсюда следует, что никакой отказобезопасности не может быть без существования защитного состояния (безопасного состояния останова).

*Реактивная отказобезопасность* характеризуется быстрым обнаружением любой отказавшей функции системы управления и активной реакцией по переводу системы в безопасное состояние.

Системы, спроектированные согласно *принципу комбинированной (составной) отказобезопасности*, должны отвечать следующим условиям:

- в составе системы должно содержаться несколько подсистем (по крайней мере, две), которые обеспечивают ту же самую функцию безопасности;
- эти подсистемы должны быть независимыми друг от друга;
- результаты работы всех этих подсистем должны быть идентичными (комбинированная отказобезопасность со сравнением), или большинство подсистем должно иметь одинаковый результат (решение голосованием большинства);
- обнаружение отказа одной подсистемы и последующая реакция должно быть достаточно быстрыми, чтобы вероятность отказа второй подсистемы была незначительна;
- должно существовать защитное состояние;
- процедуры сравнения или решение, принятое большинством голосов, должны быть выполнены в отказобезопасном режиме и достаточно быстро.

*Безопасность информации* автоматизированных систем низового уровня управления перевозочным процессом состоит в обеспечении *целостности и доступности информации*. Задача обеспечения *конфиденциальности информации* в этих системах имеет второстепенное значение и сводится к защите от внутренних нарушителей, поскольку эти системы в большинстве своем не решают задачи обмена информацией. Требования в отношении целостности и доступности информации реализуются, главным образом, на основе указанных выше принципов функциональной безопасности. Требования к безопасности информации систем управления на железнодорожном транспорте в основном сосредоточены на требованиях к безопасности ПО. Эти требования задают для обеспечения такого состояния ПО, при котором оно не содержит недеklarированных возможностей (НДВ) и уязвимостей, создающих угрозу безопасному и безотказному функционированию системы.

Эти требования на низовом уровне управления перевозочным процессом задаются для обеспечения защи-

ценности системы (включая составное ПО, обрабатываемые и хранимые данные) от следующих воздействий:

- случайного и преднамеренного характера воздействий, главным образом, внутренних нарушителей;
- от последствий ошибок при хранении, вводе, выводе и обработке информации;
- от нарушений целостности и доступности ПО системы управления при собственных сбоях и после перезагрузок, вызванных сбоями и отказами аппаратных средств системы.

При задании требований по безопасности информации на систему управления разработчик приводит в соответствие уровень доверия к безопасности ПО и функциональные требования по информационной безопасности ПО системы.

Функциональные требования по безопасности ПО также задают на основе модели угроз безопасности информации на систему управления с использованием нормативных документов национального регулятора и заказчика системы.

Уровень доверия к безопасности информации системы задают в зависимости от установленной или предполагаемой категории значимости системы управления как объекта критической информационной инфраструктуры и/или в зависимости от установленного или предполагаемого класса защищенности системы управления как автоматизированной системы управления (составной части автоматизированной системы управления) технологическими процессами критически важных объектов, определяемых в соответствии с нормативными правовыми актами в области обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации [57–59].

Для ПО систем управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте задают один из двух уровней доверия к безопасности информации (по мере возрастания требований: низкий уровень – 6, средний уровень – 5).

При этом:

- ПО, соответствующее 6 уровню доверия, может использоваться в системах третьей категории значимости и (или) третьего класса защищенности;
- ПО, соответствующее 5 уровню доверия, может использоваться в системах второй и третьей категории значимости и (или) второго и третьего класса защищенности;

В случае, если для систем управления на железнодорожном транспорте не была установлена категория значимости и класс защищенности, то рекомендуется задавать уровень доверия к безопасности информации в системе не ниже 6 уровня.

Функции информационной безопасности не должны отрицательно влиять на требуемую производительность (включая время отклика), эффективность, надежность и выполнение функций, важных для обеспечения ФБ [60, п. 5.2, перечисление с).

Любые меры информационной безопасности, которые рассматриваются для включения в проект системы,

следует оценивать в части возможности их влияния на возникновение неисправностей, приводящих к отказам по общей причине, между системами, которые диверсифицированы по соображениям безопасности. При обнаружении таких рисков следует по мере необходимости внедрять альтернативные средства обеспечения надлежащей безопасности информации.

Программно-аппаратные средства обеспечения безопасности информации, включенные в составные системы зоны управления перевозочным процессом низового уровня, не должны снижать эффективности функций безопасности систем управления.

Для категоризованных значимых объектов КИИ (а также для объектов без категории) согласно требованиям приказа ФСТЭК России [58] базовые требования к системам АСУ ТП ЖТ 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 несанкционированного доступа;
- обеспечение целостности программ и данных;
- обеспечение доступности информации для легальных пользователей в пределах их полномочий;
- отсутствие недеklarированных возможностей;
- 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 защиты информации объектов КИИ.

## Заключение

Рассмотрены проблемы обеспечения безопасности в АСУ ТП ЖТ низового уровня управления. Проведен анализ стандартов по функциональной безопасности, включающий основные тенденции развития стандартизации на ближайшую перспективу. Представлена концепция безопасности зоны управления перевозочным процессом низового уровня, в которой впервые сформулированы основные принципы обеспечения безопасности. Определены требования безопасности информации к АСУ ТП ЖТ.

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

## Библиографический список

1. IEC 60300:1997 Dependability Management. (Управление обобщенной надежностью) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.en-standard.eu/bs-iec-60300-3-6-1997-dependability-management-application-guide-software-aspects-of-dependability/> (дата обращения: 14.10.2024).

2. CENELEC EN 50126-1:2017 (MAIN) Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS process (Применения на ж/д транспорте. Общий процесс RAMS) [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/e5456892-eb2c-437e-8c4b-91c08007f0b4/en-50126-1-2017> (дата обращения: 14.10.2024).

3. EN 50128:2011/AC:2014 – Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems (Применения на ж/д транспорте. ПО для СУ и систем обеспечения безопасности на ж/д транспорте) [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/6b4df0cf-4054-4bff-9207-9d1b0d0473ed/en-50128-2011> (дата обращения: 14.10.2024).

4. CENELEC EN 50159:2001 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems (Применения на ж/д транспорте. Передача инф, связанной с безопасностью, в откр./загр. системах связи) [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14256321/EN%2050159> (дата обращения: 14.10.2024).

5. CENELEC EN 50129:2003 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling (Применения на ж/д транспорте. Системы коммуникаций, сигнализации и обработки данных. Электронные системы сигнализации, связанные с безопасностью) [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.globalspec.com/std/1266373/en-50129> (дата обращения: 14.10.2024).

6. ГОСТ Р 52980-2008. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. системы программируемые электронные железнодорожного применения. Требования к программному обеспечению. М.: Стандартинформ, 2009. III, 20 с.

7. СТО РЖД 1.19.007-2009. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Требования к программам обеспечения безопасности. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 4 декабря 2009 г. № 2473/р. II, 9 с.

8. СТО РЖД 1.19.008-2009. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Выбор и общие правила задания требований по безопасности. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 31 июля 2009 г. № 1623/р. III, 36 с.

9. СТО РЖД 1.19.009-2009. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Доказательство безопасности. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 4 декабря 2009 г. № 2471/р. III, 6 с.

10. СТО РЖД 1.02.030-2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Политика обеспечения безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности объектов железнодорожного транспорта. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 декабря 2011 г. № 2666/р. III, 44 с.

11. СТО РЖД 1.02.034-2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надеж-

ности (УРРАН). Общие правила оценки и управления рисками. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 13 декабря 2010 г. № 2570/р. III, 45 с.

12. СТО РЖД 1.02.035-2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок определения допустимого уровня риска. Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 13.12.2010 г. № 2570/р. III, 18 с.

13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. М.: Стандартинформ, 2011. V, 100 с.

14. EN 50128:2011 (MAIN) Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems (Применение для железнодорожного транспорта. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Программное обеспечение для железнодорожных систем управления и безопасности).

15. ГОСТ Р 54505-2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. М.: Стандартинформ, 2012. III, 35 с.

16. ГОСТ Р 54833-2011. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на сортировочных станциях. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2012. III, 12 с.

17. EN 50126-5-2012 (MAIN) Railway applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 5: Functional Safety – Software (Железнодорожные приложения. RAMS. Функциональная безопасность. Программное обеспечение).

18. ГОСТ 61508-1-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014. V, 53 с.

19. ГОСТ 61508-2-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 2. Требования к системам. М.: Стандартинформ, 2014. V, 81 с.

20. ГОСТ 61508-4-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014. V, 30 с.

21. ГОСТ 61508-5-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 5 Рекомендации по применению методов определения уровней полноты безопасности. М.: Стандартинформ, 2014. V, 34 с.

22. ГОСТ 61508-6-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 6. Руководство по применению ГОСТ Р МЭК 61508-2 и ГОСТ Р МЭК 61508-3. М.: Стандартинформ, 2014. VII, 156 с.

23. ГОСТ 61508-7-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 7. Методы и средства. М.: Стандартинформ, 2014. V, 95 с.
24. ГОСТ Р 54897-2012. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2012. III, 28 с.
25. ГОСТ Р 54898-2012. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных перегодах. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2012. III, 12 с.
26. ГОСТ Р 54899-2012. Системы диспетчерской централизации и диспетчерского контроля движения поездов. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2012. III, 12 с.
27. ГОСТ Р 54900-2012. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на перегодах железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2012. III, 11 с.
28. СТО РЖД 02.049-2014. Автоматизированные системы управления технологическими процессами и техническими средствами железнодорожного транспорта. Требования функциональной и информационной безопасности программного обеспечения. Порядок оценки соответствия. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30 декабря 2014 г. № 3192/р. III, 21 с.
29. ГОСТ Р 51583-2014. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2015. III, 15 с.
30. ГОСТ Р 33432-2015. Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта. М.: Стандартинформ, 2016. II, 22 с.
31. ГОСТ 33358-2015. Безопасность функциональная. Системы управления и обеспечения безопасности движения поездов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2018. III, 16 с.
32. ГОСТ Р 33433-2015. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 35 с.
33. ГОСТ 33435-2015. Устройства управления, контроля и безопасности железнодорожного подвижного состава. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 46 с.
34. СТО РЖД 02.051-2015. Микропроцессорные устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Программное обеспечение. Требования функциональной безопасности. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 11 февраля 2016 г. № 241/р. III, 28 с.
35. ГОСТ 34009-2016. Средства и системы управления железнодорожным тяговым подвижным составом. Требования к программному обеспечению. М.: Стандартинформ, 2018. III, 16 с.
36. ГОСТ Р МЭК 62279-2016. Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Программное обеспечение систем управления и защиты на железных дорогах. М.: Стандартинформ, 2017. VI, 96 с.
37. ГОСТ 33892-2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на сортировочных станциях. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2019. III, 12 с.
38. ГОСТ 33893-2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных перегодах. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 12 с.
39. ГОСТ 33894-2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 27 с.
40. ГОСТ Р 58489-2019/IEC/TS 61508-3-1:2016. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 3-1. Требования к программному обеспечению. Повторное использование части программного обеспечения для реализации всей или части функции безопасности. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 8 с.
41. ГОСТ 33895-2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на перегодах железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 11 с.
42. ГОСТ 33896-2016. Системы диспетчерской централизации и диспетчерского контроля движения поездов. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2019. III, 12 с.
43. ГОСТ Р МЭК 62443-3-3-2016. Сети промышленной коммуникации. Безопасность сетей и систем. Часть 3-3. Требования к системной безопасности и уровни безопасности. М.: Стандартинформ, 2016. VII, 62 с.
44. ГОСТ Р МЭК 62280-2017. Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Требования к обеспечению безопасной передачи информации. М.: Стандартинформ, 2017. IV, 50 с.
45. СТО РЖД 02.052-2017. Требования функциональной и информационной безопасности к системам управления тяговым подвижным составом. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 10 октября 2017 г. № 2057/р. III, 14 с.
46. ГОСТ 61508-3-2018. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 3. Требования к программному обеспечению. М.: Стандартинформ, 2018. V, 108 с.
47. ГОСТ Р 58285-2018. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на высокоскоростных железнодорожных линиях. Системы интервального регулирования движения поездов. Требования безопасности и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2018. III, 8 с.
48. ГОСТ Р 58412-2019. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Угрозы безопасности информации при разработке программного обеспечения. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 23 с.

49. IEEE 1483-2000 Standard for the Verification of Vital Functions in Processor-Based Systems Used in Rail Transit Control. March 30, 2000.

50. ГОСТ Р 59263-2020. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики микропроцессорные. Требования к интерфейсам и протоколам обмена информацией. М.: Стандартиформ, 2020. IV, 12 с.

51. ГОСТ Р 59505-2021/IEC TR 63069:2019. Изменение, управление и автоматизация промышленного процесса. Основные принципы обеспечения функциональной безопасности и защиты информации. М.: Стандартиформ, 2021. IV, 28 с.

52. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27034-1-2014. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Безопасность приложений. М.: Стандартиформ, 2015. IX, 64 с.

53. ГОСТ 34673.3-2022. Тяговый подвижной состав железнодорожный. Часть 3. Методы контроля выполнения функций устройствами, обеспечивающими безопасность движения. М.: Российский институт стандартизации, 2022. IV, 16 с.

54. ГОСТ Р 33435-2023. Устройства управления, контроля и безопасности железнодорожного подвижного состава. Требования безопасности и методы контроля. М.: Российский институт стандартизации, 2023. IV, 46 с.

55. ГОСТ Р 70732-2023. Автоматизированные системы управления технологическими процессами и техническими средствами железнодорожного транспорта. Требования к функциональной и информационной безопасности программного обеспечения и методы контроля. М.: Российский институт стандартизации, 2023. IV, 19 с.

56. Брабанд Й., Хироа Ю., Людеке Д.Ф. Взаимосвязь между стандартами CENELEC в области железнодорожной сигнализации и другими стандартами по безопасности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ibtrans.ru/upload/iblock/b02/b025373096194a4b9c9a7cebb4a43352.pdf> (дата обращения: 14.10.2024).

57. 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. Утв. приказом ФСТЭК России от 14.03.2014 г. № 31.

58. Требования по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Утв. приказом ФСТЭК России от 25.12.2017 г. № 239.

59. Требования по безопасности информации, устанавливающие уровни доверия к средствам технической защиты информации и средствам обеспечения безопасности информационных технологий. Утв. приказом ФСТЭК России от 02.06.2020 г. № 76.

60. IEC 62859:2016 Nuclear power plants – Instrumentation and control systems – Requirements for coordinating safety and cybersecurity.

## References

1. IEC 60300:1997 Dependability management. (accessed 14.10.2024). Available at: <https://www.en-standard.eu/bs-iec-60300-3-6-1997-dependability-management-application-guide-software-aspects-of-dependability/>.

2. CENELEC EN 50126-1:2017 Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS process. (accessed 14.10.2024). Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/e5456892-eb2c-437e-8c4b-91c08007f0b4/en-50126-1-2017>.

3. EN 50128:2011/AC:2014 – Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems. (accessed 14.10.2024). Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/6b4df0cf-4054-4bff-9207-9d1b0d0473ed/en-50128-2011>.

4. CENELEC EN 50159:2001 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems. (accessed 14.10.2024). Available at: <https://standards.globalspec.com/std/14256321/EN%2050159>.

5. CENELEC EN 50129:2003 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling. (accessed 14.10.2024). Available at: <https://standards.globalspec.com/std/1266373/en-50129>.

6. [GOST R 52980:2008 Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems applications for railways. Software requirements]. Moscow: Standartinform; 2009. (in Russ.)

7. [STO RZD 1.19.007-2009. Railway signalling systems and devices. Requirements for safety programs. Approved by the Order of JSC RZD dated December 4, 2009 No. 2473/r. II]. (in Russ.)

8. [STO RZD 1.19.008-2009. Railway signalling systems and devices. Selection and general rules for defining safety requirements. Approved by the Order of JSC RZD dated July 31, 2009 No. 1623/r. III]. (in Russ.)

9. [STO RZD 1.19.009-2009. Railway signalling systems and devices. Safety case. Approved by the Order of JSC RZD dated December 4, 2009 No. 2471/r. III]. (in Russ.)

10. [STO RZD 1.02.030-2010. Managing asset lifecycle, risks, and dependability analysis (URRAN). Policy of reliability, availability, maintainability, and safety of railway assets. Approved by the order of JSC RZD dated December 12, 2011 No. 2666/r. III]. (in Russ.)

11. [STO RZD 1.02.034-2010. Managing asset lifecycle, risks, and dependability analysis (URRAN). General rules of risk assessment and management. Approved by the order of JSC RZD dated December 13, 2010 No. 2570/r. III]. (in Russ.)

12. [STO RZD 1.02.035-2010. Managing asset lifecycle, risks, and dependability analysis (URRAN). General rules of risk assessment and management. Procedure for defining the allowable level of risk. Approved by the order of JSC RZD dated 13.12.2010 No. 2570/r. III]. (in Russ.)

13. GOST R ISO/IEC 12207-2010. Information technology. System and software engineering. Software life cycle processes. Moscow: Standartinform; 2011. (in Russ.)

14. EN 50128:2011 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems.

15. GOST R 54505-2011. Functional safety. Risk management on railway transport. Moscow: Standartinform; 2012. (in Russ.)

16. GOST R 548332011. Automatics and telemechanics railway systems on rail classification yards. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2012. (in Russ.)

17. EN 50126 5 2012 Railway applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 5: Functional Safety – Software.

18. GOST 27.0022012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 1. General requirements. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

19. GOST 61508 2 2012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 2. Requirements for systems. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

20. GOST 61508 4 2012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 4. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

21. GOST 61508 5 2012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 5. Guidelines for methods of the determination of safety integrity levels. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

22. GOST 61508 6 2012. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 6. Guidelines on the application of GOST R IEC 61508-2 and GOST R IEC 61508-3. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

23. GOST 61508 7 2012. Functional safety of electrical electronic programmable electronic safety-related systems. Part 7. Techniques and measures. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

24. GOST R 54897-2012. Automatics and telemechanics railway systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2012. (in Russ.)

25. GOST R 54898-2012. Automatics and telemechanics railway systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2012. (in Russ.)

26. GOST R 54899-2012. Automatics and telemechanics railway systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2012. (in Russ.)

27. GOST R 54900-2012. Automatics and telemechanics railway systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2012. (in Russ.)

28. [STO RZD 02.049-2014. Automated process and equipment management systems in railway transportation. Software functional safety and information security requirements. Con-

formity confirmation procedure. Approved by the Order of JSC RZD dated December 30, 2014 No. 3192/r. III]. (in Russ.)

29. GOST R 51583-2014. Information protection. Sequence of protected operational system formation. General provisions. Moscow: Standartinform; 2015. (in Russ.)

30. GOST R 33432-2015. Functional safety. Policy and program of safety provision. Safety proof of the railway objects. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

31. GOST 33358-2015. Functional safety. Control and safety systems for train operation. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2018. (in Russ.)

32. GOST R 33433-2015. Functional safety. Risk management on railway transport. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

33. GOST 33435-2015. Control, monitoring and safety means of railway rolling stock. Safety requirements and control methods. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

34. [STO RZD 02.051-2015. Computer-based railway signalling devices. Software. Functional safety requirements. Approved by the Order of JSC RZD dated February 11, 2016 No. 241/r. III]. (in Russ.)

35. GOST 34009-2016. Control devices and systems for railway traction rolling stock. Software requirements. Moscow: Standartinform; 2018. (in Russ.)

36. GOST R IEC 62279-2016. Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Software for railway control and protection systems. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)

37. GOST 33892-2016. Railway automatics and telemechanics systems on rail classification yards. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

38. GOST R 33893-2016. Railway automatics and telemechanics systems on railway crossings. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

39. GOST 33894-2016. Railway automatics and telemechanics systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

40. GOST R 58489-2019/IEC/TS 61508-3-1:2016. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 3-1. Software requirements. Reuse of pre-existing software elements to implement all or part of a safety function. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

41. GOST 33895-2016. Railway automatics and telemechanics systems on stages of railroad lines. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

42. GOST R 33896-2016. Centralized traffic and dispatching control systems of trains movement. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

43. GOST R IEC 62443-3-3-2016. Industrial communication networks. Network and system security. Part 3-3. System security requirements and security levels. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

44. GOST R IEC 62280-2017. Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Safety communication requirements. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)

45. [STO RZD 02.052-2017. Functional safety and information security requirements for traction rolling stock control systems. Approved by the Order of JSC RZD dated October 10, 2017 No. 2057/r. III]. (in Russ.)

46. GOST 61508 3 2018. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 3. Software requirements. Moscow: Standartinform; 2018. (in Russ.)

47. GOST R 58285-2018. Railway automatics and telemechanics systems at high-speed railways. Interval train traffic systems. Safety requirements and methods of checking. Moscow: Standartinform; 2018. (in Russ.)

48. GOST R 584122019. Information protection. Secure software development. Software development life cycle threats. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

49. IEEE 1483-2000 Standard for the Verification of Vital Functions in Processor-Based Systems Used in Rail Transit Control. March 30; 2000.

50. GOST R 59263-2020. Microprocessor systems and devices of railway automatics and telemechanics. Requirements for interfaces and information exchange protocols. Moscow: Standartinform; 2020. (in Russ.)

51. GOST R 59505-2021/IEC TR 63069:2019. Industrial-process measurement, control and automation. Framework for functional safety and security. Moscow: Standartinform; 2021. (in Russ.)

52. GOST R ISO/IEC 27034-1-2014. Information technology. Security techniques. Application security. Part 1. Overview and concepts. Moscow: Standartinform; 2015. (in Russ.)

53. GOST 34673.3-2022. Railway tractive rolling stock. Part 3. Inspection methods for devices ensuring traffic safety. Moscow: Standartinform; 2022. (in Russ.)

54. GOST 33435-2023. Control, monitoring and safety means of railway rolling stock. Safety requirements and control methods. Moscow: Standartinform; 2023. (in Russ.)

55. GOST R 70732-2023. Automated control systems of technological processes and technical facilities for railway transport. Software functional and information safety requirements and control methods. Moscow: Russian Standardization Institute; 2023. (in Russ.)

56. Braband J., Hirao Y., Lüdecke D.F. Interrelation between CENELEC standards in the field of railway signalling and other safety standards. (accessed 14.10.2024). Available at: <http://www.ibtrans.ru/upload/iblock/b02/b025373096194a4b9c9a7cebb4a43352.pdf>.

57. [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 the order of the FSTEC of Russia dated 03.14.2014 No. 31.] (in Russ.)

58. [Safety requirements for significant facilities of critical information infrastructure of the Russian Federa-

tion. Approved by the order of the FSTEC of Russia dated December 25, 2017 No. 239]. (in Russ.)

59. [Information security requirements that define the levels of trust to the information security and information technology protection tools. Approved by the order of the FSTEC of Russia dated 06.02.2020 No. 76]. (in Russ.)

60. IEC 62859:2016. Nuclear power plants – Instrumentation and control systems – Requirements for coordinating safety and cybersecurity.

## 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 of the St. 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, Integrated Research and Development Unit for Information Society Technologies, 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

**Попов П.А.** – функционирование АСУ ТП железнодорожного транспорта.

**Розенберг Е.Н.** – постановка задачи.

**Сабанов А.Г.** – анализ стандартов.

**Шубинский И.Б.** – теория функциональной безопасности (концепция и основные принципы) АСУ ТП ЖТ.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## О некоторых случаях количественной оценки ущерба технической системе

### On some cases of quantitative estimation of damage to a technological system

Лобач Д.И.  
Lobach D.J.

Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Беларусь, Минск

Department of Nuclear and Radiation Safety, Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Belarus, Minsk  
[lobachd@yandex.ru](mailto:lobachd@yandex.ru)



Лобач Д.И.

**Резюме. Цель.** Цель исследований – сформулировать и продемонстрировать дополнительные экспертные возможности для рассмотрения проекта технических систем в контексте оценки нанесения ему возможного ущерба, которые могут быть использованы для относительного сравнения проектируемых, планируемых или применяемых объектов анализа, выработки стратегий и рекомендаций для дальнейшей эксплуатации.

**Метод.** В статье применяются методы относительного анализа количественных закономерностей. **Результат.** Использование дополнительных экспертных подходов позволит провести наработку опыта для сравнения проектов, определение потенциальных их возможностей в разрезе осуществления дальнейших модификаций и модернизаций.

**Вывод.** Предложенный подход относительного анализа количественных закономерностей позволяет выработать стратегии и рекомендации для выбора среди конкурирующих технологических решений, принятия решения по управлению системой, планировать финансирование производств на основании имеющихся, установленных экспертами, недостатков безопасности и «слабых звеньев» в техническом обеспечении или управлении организацией.

**Abstract. Aim.** The research aims to define and demonstrate additional expert-based methods of examining technological systems in the context of possible damage assessment, that can be used for relative comparison of designed, planned or operated objects of analysis, development of strategies and recommendations for further operation.

**Method.** The paper uses methods of relative analysis of quantitative patterns. **Result.** The use of additional expert-based methods will allow building know-how to compare technological system designs in the absence of operational experience, to identify their potential capabilities in the context of further modifications and upgrades.

**Conclusion.** The proposed method of relative analysis of quantitative patterns allows developing strategies and recommendations for choosing among competing technological solutions, system management decision-making, and planning production funding based on existing, expert-defined safety and security deficiencies and “weak links” in the technological capabilities or management of a company.

**Ключевые слова:** экспертная оценка, безопасность, эксплуатационный опыт, сэйфгеометрика, несанкционированные действия, ущерб, техническая система

**Keywords:** expert assessment, safety, operational experience, safeometrics, unauthorized actions, damage, technical system

**Для цитирования:** Лобач Д.И. О некоторых случаях количественной оценки ущерба технической системе // Надежность. 2024. №4. С. 58-64. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-58-64>

**For citation:** Lobach D.J. On some cases of quantitative estimation of damage to a technological system. Dependability 2024;4:58-64. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-58-64>

**Поступила:** 22.06.2024 / **После доработки:** 21.08.2024 / **К печати:** 18.11.2024

**Received on:** 22.06.2024 / **Revised on:** 21.08.2024 / **For printing:** 18.11.2024

## Введение

Для успешного продвижения коммерческих проектов устройств, систем и технологий в промышленности, атомной энергетике производителю важно продемонстрировать преимущества новых решений в технике [1-3]. При выборе между несколькими дорогостоящими проектами заказчику тоже следует проводить свои собственные оценки технологий, обращаться к экспертам для осуществления независимого анализа проектов, которые еще не имеют достаточного количества экспериментальных и эксплуатационных данных. Зачастую действия заказчика мотивируются также тем, чтобы получить от реализации проекта значимый экономический эффект в недолгосрочной перспективе. Однако при этом иногда под сомнение могут попадать как выбор неапробированных технологий безопасности, так состав и качество применяемых инновационных технических систем (далее – ТС) и оборудования, а сам проект может потом дорабатываться при своей реализации с использованием технических решений в ходе модификаций. По этой причине не существует абсолютно одинаковых референтных проектов.

Недостаточное количество опытных данных является основной проблемой проведения традиционных экспертных оценок и экспертиз, упомянутых в литературе как процедуры «*safety assessment*», «*risk assessment*», «*security assessment*», на которых базируются подходы, рассматриваемые, например, в документах Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в контексте детерминистического и вероятностного анализа.

ТС являются структурно-сложными, и для анализа их безопасности разработаны некоторые комплексные подходы, например, в разрезе вопросов качественной оценки состояния безопасности и синтеза рисков в управлении безопасностью [4, 5]. В работах [6, 7] отмечались направления развития вычислительного аппарата для проведения экспертных оценок проектов в разрезе вспомогательной концепции, основанной на аналогиях с подходами *хемометрики*.

Следует отметить, что оценка проекта может быть проведена как в части параметров его функционирования, так и для характеристик препятствующих, сдерживающих работу. К числу последних можно отнести внутренние и внешние факторы, угрозы, такие как *несанкционированные (злоумышленные) действия* в отношении проекта, например, случайные непреднамеренные действия непрофессионала из-за низкой культуры безопасности, намеренные акции инсайдера (внутреннего нарушителя), внешняя диверсия, саботаж [8–10].

Проведение оценки ущерба проекту позволит определить значимость и критическую величину факторов, угнетающих производство. В дальнейшем, каждому уровню ущерба будут соответствовать те или иные последствия, к которым следует либо подготовиться, либо

их предотвратить. Рекомендации экспертов по таким вопросам могут являться существенными для создания информационного фона и условий реализации новых проектов или определения их конкурентоспособности на рынке технологий.

В силу специфических потребностей и развития личности в цифровую эпоху у людей практически сформировалось клиповое мышление [11]. Эксперты и специалисты управления предпочитают получать короткую и наглядную информацию, прослеживается их ориентация на быстрый результат. Влияние человеческого фактора в человеко-машинных ТС присутствует постоянно, и поэтому для опасных производств проводится всестороннее интенсивное изучение этого явления [12–16]. В такой ситуации подходящими для оценок будут простые закономерности между параметрами проекта, которые позволяют проанализировать и получить ответ, принять решение за непродолжительное время.

При недостатке эксплуатационных данных и опыта для технических проектов вспомогательные методы *сэйфеометрики* для оценки параметров технологий позволяют развивать дополнительные экспертные возможности [7].

## 1. Основные направления экспертного рассмотрения проекта в контексте оценки нанесения ему возможного ущерба

Главная задача аналитиков при проведении экспертных оценок – понять и интерпретировать текущее состояние производственной системы в разрезе оценки дальнейших затрат при использовании заявленных в проекте технологий, определить уровень безопасности в ТС и ее компонентах в контексте недостижения или близости *наихудшего события* (далее – НС) в ТС, т.е. когда будет причинен наибольший урон технике, а экономические затраты на восстановление значительны или превосходят уже выделенные (запланированные). Эксперт определяет, насколько далеко в технологическом смысле (с учетом износа, порчи, устаревания техники) от текущего состояния находится НС, при правильной и полной эксплуатации оборудования проекта, деградации и старении оборудования, злоумышленных действиях и т.п.

Эксперт должен также оценить влияние на состояние ТС самой эксплуатации, использования технологий, влияние внутренних и внешних факторов на состояние и функционирование глубокоэшелонированной защиты *систем безопасности* (далее – СБ), способности производственной системы для поддержания условий безопасной эксплуатации.

Обычно эксперт может ограничиться рассмотрением соответствия технологии требованиям нормативной и проектной документации, где имеются конкретные

положения, которые редко охватывают комплексные ситуации. Этому также способствуют специализации экспертов и ограниченность в их компетентности. Например, в атомной промышленности разделяются анализ и рассмотрение ядерной и радиационной безопасности (аспекты функционирования ядерных технологий) и ядерной физической безопасности (вопросы физической защиты и сохранности ядерного и радиоактивного материала). Хотя МАГАТЭ продвигает концепцию понимания синергии этих вопросов, но на уровне рассмотрения вопросов специалистами и экспертами доминирует узкая специализация.

Для более детального, полного и всестороннего рассмотрения, анализа и оценок проекта надо уделить внимание комплексным вопросам, таким как:

- построение системной деятельности по обеспечению безопасности производства (должны быть понятная организационная структура, реальная компетентность руководителей, ясная система контроля исполнения и т.п.);

- поиск «слабых звеньев» в СБ и организационной структуре (уменьшение влияния человеческого фактора, дублирование и контроль управляющих систем, приоритетное их диагностирование и техническое обслуживание);

- планирование адекватного ответа угрозам, в т.ч. в контексте проектной угрозы (рациональность построения систем проекта и их компонентов, проведение организационных мероприятий по компенсации «слабых звеньев» и недостатков и т.п.);

- планирование экономических затрат на обеспечение безопасности производства (заблаговременное выделение финансовых средств и пополнение ресурсов, поддержание требуемых запасов материальных ценностей).

По результатам экспертного анализа заказчику проекта или оценки важно представлять достоинства и недостатки технологии с целью устойчивой ее эксплуатации, планирования своего бюджета [3]. Такой анализ можно проводить путем сравнения с референтными образцами, ранее реализованными аналогами, технологиями конкурентов или в рамках дихотомии «безопасно» / «небезопасно» (рискованно).

## 2. Методология

В работе [6] говорилось, что подходящие априорные параметры проекта могут быть использованы для сравнения характеристик планируемых к созданию технологий с уже существующими, реализованными конструкциями для которых имеется достаточное количество эксплуатационных данных, апробированный эксплуатационный опыт.

В концепции сэйфеометрики [7] можно устанавливать связи и зависимости между параметрами как для поиска преимуществ новых проектов, так и для определения их недостатков и «слабых звеньев». Анализ и рекомендации экспертов в этом направлении

будут влиять на уточнение для проекта соотношения «польза» / «вред», определения приемлемости новой технологии для общества.

Применяемые экспертом дополнительные методы анализа должны рассматривать проект вглубь с целью поиска полезных решений и неудачных суперпозиций элементов в ТС. В наилучшем случае такие методы должны быть подобны и инвариантны при переходе рассмотрения от общего к частному и обратно, описаны в регламентированных рекомендациях, но следует допустить и применение экспертом своих «*know-how*».

Говоря об использовании для экспертных оценок величины степени опасности  $\alpha$  [6], следует сказать, что этот подход может быть применим как для ТС в целом, так и для конкретных промышленных систем, узлов, устройств и элементов. В обоих случаях степень опасности определяется как  $\alpha = N_{CB} / M_{\phi}$ , где  $N_{CB}$  – количество СБ для рассматриваемого технического объекта,  $M_{\phi}$  – количество проектных или запроектных факторов опасности (предписанных событий или отказов или иного, на усмотрение эксперта) для этого технического объекта.

Как было отмечено в [6], при  $\alpha \leq 1$  применение СБ является более эффективным. В других случаях, когда  $\alpha > 1$ , следует учесть во внимание природу факторов опасности, их суперпозицию (в разрезе усиления, умножения и синергии), действительно ли им необходимо противопоставить несколько СБ. В этом смысле следует отдавать предпочтение не активным СБ, а пассивным, следящим системам СБ. В большинстве технических случаев активные СБ требуют использования резервных источников энергии, а также дополнительных систем управления и энергонезависимой автоматизации. Такие технологические элементы могут иметь «слабые звенья», а при проверке их функционирования в ходе производственных экспериментов не всегда удается создать или смоделировать фактические условия их срабатывания.

На практике для  $\alpha$  можно получить проектное и фактическое значения. Важно рассмотреть задействованное количество СБ и фактическое количество факторов опасности. Их соотношение может оказывать влияние на экономический вклад в стоимость проекта. В этом контексте можно проанализировать, был ли осуществлен запас свойств для безопасности или тут проведена необоснованная экономия средств при реализации проекта ТС.

Особое значение увеличению количества СБ и их разнообразию придается в проекте при борьбе с несанкционированными действиями. Это связано с противодействием ущербу технологии от них и минимизации его последствий.

При нанесении ущерба ТС или элементу уровень их безопасности не остается неизменным, он понижается. Сам ущерб априори предполагает нанесение определенного урона проекту. Основной единицей измерения ущерба будет денежная единица стоимости нанесенного

уруна (технике, организационной структуре, ресурсам организации и т.п.).

Тем не менее, если считать, что ущерб был нанесен (состоялся), то уровень безопасности тоже был изменен или систематически понижен. Будем полагать, что любой ущерб можно связать с эквивалентом безопасности, а суммарный ущерб – с эквивалентом для суммарной безопасности и т.д.

Явлению ущерба от случайных непреднамеренных действий персонала можно сопоставить статистический разброс  $\Delta$  для значения уровня безопасности  $\bar{Q}$ , связанного с определенным уровнем культуры безопасности в организации:  $\bar{Q} \pm \Delta$ .

В ходе спланированного несанкционированного действия величина существующего уровня безопасности  $\bar{Q}$  будет уменьшена систематическим образом. При диверсии конечный уровень безопасности  $Q_d$  будет меньше  $\bar{Q}$  на величину эквивалента ущерба  $W_\Sigma$  от вреда диверсии  $D$ :  $Q_d = \bar{Q} - W_\Sigma$ .

Диверсии и саботаж обычно проводятся в отношении рабочих систем производства. Предприятия являются привлекательными для проведения несанкционированных действий с точки зрения своего уровня технологической насыщенности. Техника будет более уязвимой, чем людские, рабочие или управленческие ресурсы в организации. Поврежденные элементы технологий зачастую нельзя быстро исправить, технические мероприятия замены, ремонта и диагностики являются длительными, требуются дополнительные незапланированные экономические средства и ресурсы, проведение возможных необходимых заказов комплектующих на других производствах и др.

Под технологической насыщенностью проекта (в контексте оснащения рабочим оборудованием, техническими комплексами и т.п.) будем понимать величину  $\Theta = 1/\tau = N_{PC}/N_{CB}$ , где  $\tau$  – уровень технологической насыщенности СБ [6],  $N_{PC}$  – количество рабочих систем (далее – РС),  $N_{CB}$  – количество СБ.

При  $\Theta < 1$  на одну РС приходится несколько СБ и поэтому имеется запас безопасности. Если  $\Theta > 1$ , то имеется потенциальный дефицит безопасности (одна СБ приходится на несколько РС). Когда на одну РС приходится одна СБ ( $\Theta = 1$ ), то такая ситуация может быть присуща простым устройствам (например, механизму включения соответствует механизм выключения и всего в ТС имеется два состояния [7]).

Полагаем, что ущерб производству наносится через вывод из строя РС и (или) СБ, которые все функционируют независимо друг от друга. РС сгруппированы от простых к сложным. Сложная ТС может быть рассмотрена как совокупность простых. Комплексы технологии и производства отличаются друг от друга только количеством этих ТС и их соотношением.

Вред, который наносит злоумышленник, связан с выводом из строя СБ, которые отвечают за функционирование тех или иных РС (стратегия нанесения умышленного ущерба). Вывод из строя СБ будет соот-

ветствовать выводу из строя и РС. Если РС была выведена из строя, то можно полагать, что ответственная за нее СБ не сработала качественно. Величина ущерба от вывода из строя каждой СБ пропорциональна риску ущерба. Предположим, что действия злоумышленника (вред)  $D$  связаны с выводом из строя СБ ( $D \propto N_{CB}$ ), которые по своим свойствам тождественны и независимы. Из теории вероятностей для независимых событий величина суммарного ущерба  $W_\Sigma$  будет кратна произведению рисков ущерба при выводе из строя каждой СБ, которая подверглась несанкционированному действию. Такая ситуация подходит для случая с  $\Theta = 1$ . Однако на практике следует более детально учитывать соотношение  $N_{PC}$  и  $N_{CB}$ .

Если  $\Theta < 1$ , то при запасе безопасности СБ могут быть связаны друг с другом, задублированы. Такая система будет безопасной. Уровень ее безопасности не будет быстро понижаться. При этом величина суммарного ущерба стремится к предельному ущербу  $W_\Sigma \rightarrow W_{KP}$ . Эта величина связана с достижением системой минимального уровня безопасности от диверсии или саботажа, с экономической эффективностью проекта в этом случае.

При  $\Theta > 1$  системе возможно нанесение серьезных повреждений. Последовательный выход нескольких СБ из строя определяет значительное увеличение ущерба и понижение уровня безопасности. Системе может быть нанесен критический вред  $D_{KP}$  (соответствует выходу из строя критического количества СБ), и тогда ее функционирование будет экономически неэффективно. Для такого значения  $\Theta$  можно полагать, что мы будем иметь дело с рискованной системой.

На основании определения  $\Theta$  для указанных случаев соотношения  $N_{PC}$  и  $N_{CB}$  изменение  $W_\Sigma$  при нанесении вреда злоумышленником  $D$  может быть описано эмпирическим способом с использованием степенных зависимостей типа  $W_\Sigma = D^\Theta$  и представлено на рис. 1.

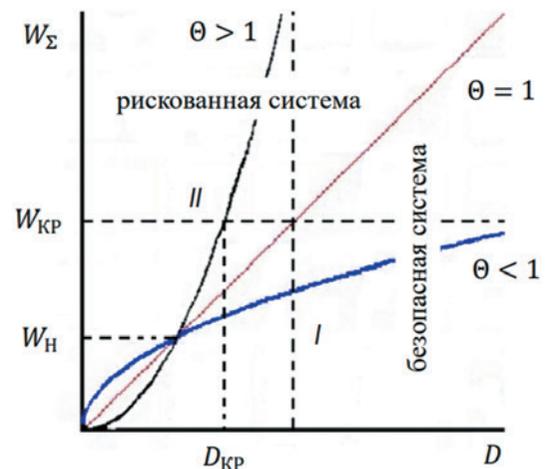


Рис. 1. Зависимость величины суммарного ущерба  $W_\Sigma$  для разных случаев технологической насыщенности проекта  $\Theta$

Системы с  $\Theta < 1$  в области I (см. рис. 1) можно отнести к безопасным системам, для которых риск серьезных по-

вреждений (ущерба) низкий. Предположим, что целью несанкционированного действия является нанесение вреда  $D_{кр}$ . Тогда изменение уровня безопасности  $Q$  ограничивается критическим изменением уровня безопасности, соответствующим  $W_{кр}$ , которое характеризует и формирует понимание устойчивости экономической эффективности проекта при несанкционированных действиях. Безопасные системы функционируют в диапазоне  $W_{\Sigma} < W_{кр}$ , но при  $D > D_{кр}$ .

При  $\Theta > 1$  в области II (см. рис. 1) для ТС характерен высокий риск серьезных повреждений (нанесения существенного ущерба от причинения вреда). Рискованные системы не будут функционировать при  $D > D_{кр}$ , поскольку  $W_{\Sigma} > W_{кр}$ , т.е. наступит состояние, когда цель несанкционированного действия будет достигнута.

Если  $W_{\Sigma} \leq W_H$ , то можно полагать, что ТС находится в состоянии, когда величина причиненного ей ущерба не превышает тех масштабов, которые обусловлены существующим уровнем культуры безопасности в организации, т.е.  $W_H = \Delta$ .

Проведем анализ изменения величины суммарного ущерба  $W_{\Sigma}$  для ТС при разных степенях опасности  $\alpha$ .

При неизменной величине количества проектных и (или) запроектных факторов опасности для технического объекта, увеличение нанесенного вреда (при выводе из строя СБ) приводит к повышению суммарного ущерба, поэтому решением уравнения  $dW_{\Sigma} = \alpha \times D \times dD$  будет функция типа  $W_{\Sigma} = \alpha \times \frac{D^2}{2} + d$ , где  $d$  – коэффициент. На рис. 2 представлены функции указанного вида для нескольких значений степеней опасности  $\alpha$  ( $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$ ,  $d=0$ ).

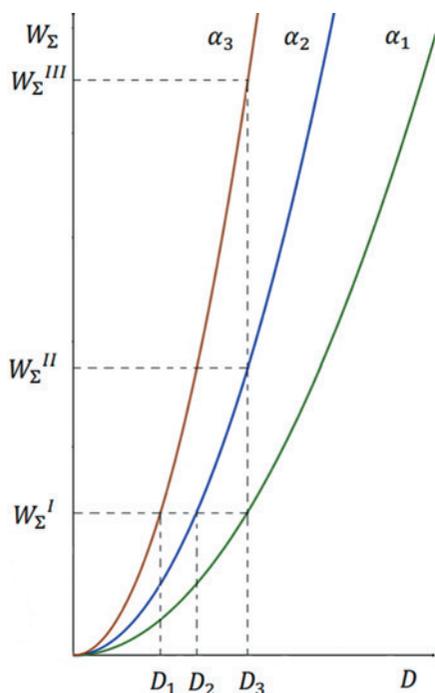


Рис. 2. Зависимость величины суммарного ущерба  $W_{\Sigma}$  для разных случаев степеней опасности  $\alpha$

ТС с  $\alpha_1$  является более интеллектуальной, поскольку ее управление использует меньшее количество систем или элементов безопасности для нейтрализации факторов опасности, чем для  $\alpha_3$  (более простая ТС). Следует отметить, что одинаковый вред нанесет меньший ущерб в интеллектуальной системе, чем в простой ( $D = \text{const}, W_{\Sigma}^I < W_{\Sigma}^{II} < W_{\Sigma}^{III}$ ). Для нанесения одинакового ущерба в отношении интеллектуальной системы необходимо совершить более тяжкое несанкционированное действие, чем в отношении простой ( $W_{\Sigma} = \text{const}, D_1 < D_2 < D_3$ ).

Из анализа функций (см. рис. 2) видно, что простая система быстрее уменьшает безопасность, чем интеллектуальная [7]. Одинаковый вред нанесет простой системе больший ущерб, чем интеллектуальной, где имеется запас безопасности. Для одинакового ущерба простой системе надо нанести меньше вреда.

С использованием дополнительных аналитических инструментов эксперт в ходе проведения своей работы, на основании полученных данных может предлагать изменения в технические проекты в части повышения их уровня безопасности, технологической насыщенности проекта, изменения состава оборудования систем управления и его качества, внесения изменений в системы «человек-человек» и «человек-машина» с целью уменьшения их уязвимости к несанкционированным действиям.

### 3. О выводах эксперта, выработке им стратегий и рекомендаций

По результатам проведенного анализа квалифицированный эксперт должен как описать и представить уровень текущего состояния безопасности производства, так и предложить стратегии и рекомендации по повышению уровня безопасности или его поддержанию на уровне приемлемых потерь и ущербов. Глубина оценки зависит от компетентности эксперта и полноты доступа к информации о проекте, об имеющемся эксплуатационном опыте, характеристиках аналогов, референтных и конкурирующих технологиях.

Чтобы нанесенный ТС вред был незначительным, она должна быть интеллектуальной [7], иметь противовесы, дублирование СБ, высокий уровень контроля, самозащищенности, обладать свойством самовосстановления, быть устойчивой к несанкционированным воздействиям. Такие свойства проекта недостаточно указать в общем виде в нормативных документах. Поскольку они являются комплексными, то на практике их трудно проверить и проконтролировать. На производстве должна быть разработана система мер по постановке под контроль мероприятий самовосстановления и самозащищенности (во всех аспектах, рекомендованных экспертом), контроля «слабых звеньев».

Следует отметить, что некомпетентно проведенный анализ способствует множественности последующих

специализированных оценок, которые будут нужны заказчику. Такая ситуация обычно затрудняет выработку в организации системных мер по управлению производством.

Качественно проведенная оценка аспектов функционирования проекта и его безопасности на основании текущих и (или) проектных характеристик должна также включать:

- полезные эксплуатационные стратегии (режимы эксплуатации, проведение модификаций, модернизаций и т.п.);
- стратегии безопасности (для повышения или поддержания достигнутого уровня безопасности);
- стратегии локализации недостатков проекта (с обоснованием причин);
- стратегии минимизации возможного ущерба (при определении «слабых звеньев», недостатков проекта, влиянии человеческого фактора и т.п.);
- экономические стратегии развития и устойчивости производства (в технологическом смысле, с акцентом на восстановление и защищенность).

Использование дополнительных экспертных подходов [4–7] позволит провести наработку опыта для сравнения проектов, определения потенциальных возможностей в разрезе осуществления дальнейших модификаций и модернизаций.

## Выводы

Применению прогнозных дополнительных методов оценки технологий следует уделять внимание как на этапе выбора конкурирующих технологических решений, так и в дальнейшем, при принятии решений в ходе управления. Если же проект уже принят к реализации, то независимые экспертные оценки могут быть использованы для планирования финансирования производственного процесса на основании имеющихся, установленных экспертами недостатков безопасности и «слабых звеньев» в техническом обеспечении или управлении организацией.

## Библиографический список

1. Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. GSR Part 4 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.
2. Safety of nuclear power plants: design. Specific safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. SSR-2/1 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.
3. SPSS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs [Электронный ресурс] // INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 2022. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf> (дата обращения: 21.06.2024).

4. Бочков А.В. О методах качественной оценки состояния безопасности структурно-сложных систем // Надежность. 2020. № 20(3). С. 34-46. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46

5. Бочков А.В. О методе синтеза рисков в управлении безопасностью структурно-сложных систем // Надежность. 2020. № 20(1). С. 57-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-57-67>

6. Лобач Д.И. О развитии экспертных возможностей для рассмотрения проектов оборудования и технологических решений // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. № 2. С. 38-41. DOI: 10.21122/2309-4923-2023-2-38-41

7. Лобач Д.И. Новые проблемы, методология и возможности сэйфеометрики // Промышленная безопасность. 2023. № 01. С. 34-36.

8. Nuclear security culture. Series IAEA nuclear security series, No. 7, IAEA, Vienna, 2008.

9. Preventive and protective measures against insider threats. Series IAEA nuclear security series, No. 8-G (rev. 1), IAEA, Vienna, 2020.

10. National nuclear security threat assessment, design basis threats and representative threat statements. Series IAEA nuclear security series, No. 10-G (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2021.

11. Ковалев М.М. Образование для цифровой экономики // Цифровая трансформация. 2018. № 1(2). С. 37–42.

12. Человеческий фактор и безопасность ядерных установок. Материалы Международной конференции МК-2000. Москва, Обнинск: ОНИЦ «Прогноз», 2001.

13. Абрамова В.Н. Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. Москва, Обнинск: ИГ – СОЦИН, 2009.

14. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA, Vienna, 1991.

15. Examples of safety culture practices, Safety reports series, No.1, IAEA, Vienna, 1997.

16. Key practical issues in strengthening safety culture, Safety series, No.INSAG-15, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA, Vienna, 2002.

## References

1. Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. GSR Part 4 (Rev. 1). Vienna; 2016.
2. Safety of nuclear power plants: design. Specific safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. SSR-2/1 (Rev. 1). Vienna; 2016.
3. SPSS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs.

International Atomic Energy Agency; 2022. (accessed 21.06.2024). Available at: <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf>.

4. Bochkov A.V. On the methods of qualitative estimation of the safety state of structurally complex systems. *Dependability* 2020;20(3):34-46. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46.

5. Bochkov A.V. On the method of risk synthesis in the safety management of structurally complex systems. *Dependability* 2020;20(1):57-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-57-67>.

6. Lobach D.J. About development of expert possibilities for consideration of equipment projects and technological decisions. *System analysis and applied information science* 2023;(2):38-41. DOI: 10.21122/2309-4923-2023-2-38-41. (in Russ.)

7. Lobach D.J. [New problems, methodology, and capabilities of safeometrics]. *Promyshlennaya bezopasnost* 2023;1:34-36. (in Russ.)

8. Nuclear security culture. Series IAEA nuclear security series, No. 7. Vienna; 2008.

9. Preventive and protective measures against insider threats. Series IAEA nuclear security series, No. 8-G (rev. 1). Vienna; 2020.

10. National nuclear security threat assessment, design basis threats and representative threat statements. Series IAEA nuclear security series, No. 10-G (Rev. 1). Vienna; 2021.

11. Kovalev M.M. Education for the digital economy. *Digital Transformation* 2018;(1):37-42. (in Russ.)

12. [The human factor and the safety of nuclear installations]. In: Proceedings of the International Conference MK-2000. Moscow, Obninsk: ONITS Prognoz; 2001. (in Russ.)

13. Abramova V.N. [Organizational psychology, organizational culture, and safety culture in nuclear energy]. Moscow, Obninsk: IG – SOTSIN; 2009. (in Russ.)

14. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA. Vienna; 1991.

15. Examples of safety culture practices, Safety reports series, No.1, IAEA. Vienna; 1997.

16. Key practical issues in strengthening safety culture, Safety series, No. INSAG-15, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA. Vienna; 2002.

## Сведения об авторе

**Лобач Дмитрий Иосифович** – кандидат технических наук, гражданский государственный служащий в отставке, Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск. ORCID: 0000-0001-5512-0032; ResearcherID: HKN-7220-2023; SPIN 8838-3030. Электронный адрес: [lobachd@yandex.ru](mailto:lobachd@yandex.ru)

## About the author

**Dmitry J. Lobach**, Candidate of Engineering, retired civil servant, Department on Nuclear and Radiation Safety, Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk. ORCID: 0000-0001-5512-0032; ResearcherID: HKN-7220-2023; SPIN 8838-3030. E-mail: [lobachd@yandex.ru](mailto:lobachd@yandex.ru)

## Вклад автора в статью

**Лобач Д.И.** Разработан дополнительный подход для экспертного анализа безопасности технических систем в контексте количественной оценки нанесения им ущерба, основанный на методе относительного анализа количественных закономерностей для характеристик технических систем.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

# К вопросу о взрывобезопасности объектов транспорта многокомпонентных смесей

## On the matter of explosion safety of multicomponent mixture transportation facilities

Ю.В. Гамера<sup>1</sup>, С.В. Ганага<sup>1</sup>, Ю.Ю. Петрова<sup>1\*</sup>

Gamera Yu.V., Ganaga S.V., Petrova Yu.Yu.

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ, St. Petersburg, Russian Federation

\*PetrovaYY@vniigaz.gazprom.ru



Ю.В. Гамера



С.В. Ганага



Ю.Ю. Петрова

**Резюме.** В связи со стремительным развитием нефтегазовой отрасли, интерес к вопросу оценки взрывоустойчивости зданий и сооружений на объектах транспорта и переработки многокомпонентных газовых смесей не теряет своей актуальности. В статье проведено исследование чувствительности к инициированию взрывного превращения метано-воздушных смесей водорода и гомологов метана в зависимости от компонентного состава. Получены оценки размеров детонационных ячеек метано-водородных смесей, что позволяет точнее определять класс чувствительности к детонации.

**Abstract.** Given the rapid development of the oil and gas industry, the matter of assessment of the explosion resistance of buildings and structures at multicomponent gas mixture transportation and processing facilities remains of relevance. The paper investigates the sensitivity to the initiation of explosive transformation of methane and air mixtures of hydrogen and methane homologues depending on the component composition. Estimates were obtained of the sizes of detonation cells of methane and hydrogen mixtures, which allows for a more accurate definition of the class of sensitivity to detonation.

**Ключевые слова:** водород, метан, многокомпонентная газовая смесь, чувствительность к инициированию взрывного превращения, размер детонационной ячейки

**Keywords:** hydrogen, methane, multicomponent gas mixture, sensitivity to initiation of explosive transformation, detonation cell size

**Для цитирования:** Гамера Ю.В., Ганага С.В., Петрова Ю.Ю. К вопросу о взрывобезопасности объектов транспорта многокомпонентных смесей // Надежность. 2024. №4. С. 65-69. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-65-69>

**For citation:** Gamera Yu.V., Ganaga S.V., Petrova Yu.Yu. On the matter of explosion safety of multicomponent mixture transportation facilities. Dependability 2024;4:65-69. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-65-69>

**Поступила:** 13.08.2024 / **После доработки:** 03.09.2024 / **К печати:** 18.11.2024

**Received on:** 13.08.2024 / **Revised on:** 03.09.2024 / **For printing:** 18.11.2024

В связи с промышленным спросом на технические меры безопасности, растущим интересом к водороду как альтернативному топливу и возможностью широкого использования трубопроводного транспорта исследование детонационных параметров водородо-метано-воздушных смесей является актуальным. Однако в доступной литературе наблюдается недостаток как экспериментальных, так и теоретических данных по детонационным параметрам водородо-метано-воздушных смесей для стехиометрической смеси водород-метан-воздух при начальных параметрах  $P = 1$  бар и  $T = 300$  К. В данной работе приведены некоторые расчетные результаты, полученные на базе корректировки результатов, опубликованных специалистами Института теплотехники Варшавского технологического университета [1]. Необходимость корректировки обоснована тем, что полу-

ченные с помощью расчетов результаты работы [1] не соответствуют известным экспериментальным данным. Прямое использование их на практике невозможно. Однако после использования предлагаемой процедуры корректировки вышеуказанное несоответствие можно устранить.

Проведенное в [1] исследование параметров детонации стехиометрических смесей водород-метан-воздух и размера ячейки детонационной волны было выполнено для различных содержаний водорода в смеси. В табл. 1 приведен исследуемый в [1] набор брутто-реакций горения для заданного содержания  $H_2$ , который часто применяется различными исследователями для расчета параметров детонации (давление, температура и скорость) при использовании моделей Чепмена-Жуге (CJ) и Зельдовича-Неймана-Деринга (ZND).

**Табл. 1. Брутто-реакции горения стехиометрических смесей водорода с метаном, рассматриваемые в [1]**

| H <sub>2</sub> , % | Реакции горения водородо-метано-воздушных смесей   |
|--------------------|--|
| 10                 | 0,9 CH <sub>4</sub> + 0,1 H <sub>2</sub> + 1,85 O <sub>2</sub> + 6,89 N <sub>2</sub> =<br>= 0,9 CO <sub>2</sub> + 1,9 H <sub>2</sub> O + 6,89 N <sub>2</sub> |
| 20                 | 0,8 CH <sub>4</sub> + 0,2 H <sub>2</sub> + 1,7 O <sub>2</sub> + 6,33 N <sub>2</sub> =<br>= 0,8 CO <sub>2</sub> + 1,8 H <sub>2</sub> O + 6,33 N <sub>2</sub>  |
| 30                 | 0,7 CH <sub>4</sub> + 0,3 H <sub>2</sub> + 1,55 O <sub>2</sub> + 5,77 N <sub>2</sub> =<br>= 0,7 CO <sub>2</sub> + 1,7 H <sub>2</sub> O + 5,77 N <sub>2</sub> |
| 40                 | 0,6 CH <sub>4</sub> + 0,4 H <sub>2</sub> + 1,4 O <sub>2</sub> + 5,22 N <sub>2</sub> =<br>= 0,6 CO <sub>2</sub> + 1,6 H <sub>2</sub> O + 5,22 N <sub>2</sub>  |
| 50                 | 0,5 CH <sub>4</sub> + 0,5 H <sub>2</sub> + 1,25 O <sub>2</sub> + 6,52 N <sub>2</sub> =<br>= 0,5 CO <sub>2</sub> + 1,5 H <sub>2</sub> O + 6,52 N <sub>2</sub> |
| 60                 | 0,4 CH <sub>4</sub> + 0,6 H <sub>2</sub> + 1,1 O <sub>2</sub> + 4,09 N <sub>2</sub> =<br>= 0,4 CO <sub>2</sub> + 1,4 H <sub>2</sub> O + 4,09 N <sub>2</sub>  |
| 70                 | 0,3 CH <sub>4</sub> + 0,7 H <sub>2</sub> + 0,95 O <sub>2</sub> + 3,54 N <sub>2</sub> =<br>= 0,3 CO <sub>2</sub> + 1,3 H <sub>2</sub> O + 3,54 N <sub>2</sub> |
| 80                 | 0,2 CH <sub>4</sub> + 0,8 H <sub>2</sub> + 0,8 O <sub>2</sub> + 2,98 N <sub>2</sub> =<br>= 0,2 CO <sub>2</sub> + 1,2 H <sub>2</sub> O + 2,98 N <sub>2</sub>  |
| 90                 | 0,1 CH <sub>4</sub> + 0,9 H <sub>2</sub> + 0,65 O <sub>2</sub> + 2,42 N <sub>2</sub> =<br>= 0,1 CO <sub>2</sub> + 1,1 H <sub>2</sub> O + 2,42 N <sub>2</sub> |
| 100                | 1 H <sub>2</sub> + 0,5 O <sub>2</sub> + 1,86 N <sub>2</sub> = 1 H <sub>2</sub> O + 1,86 N <sub>2</sub>   |

Расчетные исследования параметров CJ стехиометрических смесей водород-метан-воздух [1] проводились при начальном давлении 1 бар и температуре 300 К (табл. 2).

Были рассчитаны параметры CJ для стехиометрических смесей водород-метан-воздух, начиная с 10%-ного содержания H<sub>2</sub> в смеси и заканчивая чистым водородом-воздухом.

**Табл. 2. Параметры CJ для стехиометрических смесей водород-метан-воздух при начальных P = 1 бар и T = 300 К с различным содержанием H<sub>2</sub> в смеси**

| Содержание H <sub>2</sub> в смеси, % | P <sub>CJ</sub> , бар | T <sub>CJ</sub> , К | V <sub>CJ</sub> , м/с |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 10                                   | 18,892                | 3002,45             | 1875,4                |
| 20                                   | 18,816                | 3007,03             | 1880,6                |
| 30                                   | 18,727                | 3012,42             | 1886,7                |
| 40                                   | 18,607                | 3016,77             | 1893,3                |
| 50                                   | 18,517                | 3026,81             | 1909,6                |
| 60                                   | 18,333                | 3036,16             | 1914,7                |
| 70                                   | 18,113                | 3045,38             | 1928,7                |
| 80                                   | 17,846                | 3060,73             | 1949,0                |
| 90                                   | 17,482                | 3081,60             | 1978,4                |
| 100                                  | 16,955                | 3111,55             | 2024,8                |

Следует отметить, что вышеприведенные значения оказались ниже, чем расчетные значения в программе STANJAN [2] по содержанию H<sub>2</sub> в смеси. 10% H<sub>2</sub> в смеси водород-метан-воздух дает скорость CJ около 1875,4 м/с, что выше, чем в чистом метане-воздухе. Аналогично,

90% H<sub>2</sub> в смеси дает скорость CJ около 1978,4 м/с, что вполне сопоставимо с теоретической для водорода-воздуха. Аналогичная оценка была получена и для давлений CJ. Теоретическое значение давления CJ для водородо-воздушной смеси, полученное в литературе, составляет 15,8 бар, а для метано-воздушной смеси – 17,4 бар. Эти значения оказались ниже, чем рассчитанные в STANJAN по содержанию H<sub>2</sub> в смеси. 10% H<sub>2</sub> в водородо-метано-воздушной смеси дают давление CJ около 18,9 бар, что выше, чем в чистом метане-воздухе. Аналогично 90% H<sub>2</sub> в смеси дает давление CJ около 17,5 бар, что также выше теоретического для чистого водорода.

В программах STANJAN и CANTERA [3] были проведены расчеты параметров детонации CJ стехиометрических водородо-метано-воздушных смесей. Рассчитанные скорости и давления детонации несколько ниже в случае результатов CANTERA, чем в случае результатов STANJAN. Это связано с тем, что два инструмента не учитывают при расчетах одни и те же виды свободных радикалов, что может приводить к несколько различным значениям.

Увеличение содержания водорода в смеси обуславливает более высокие значения скоростей CJ и более низкие значения давлений CJ. В табл. 3 представлены давление и скорость CJ в зависимости от содержания H<sub>2</sub>, рассчитанные для стехиометрической смеси водород-метан-воздух при начальных P = 1 бар и T = 300 К.

**Табл. 3. Значения скоростей и давлений CJ для различных концентраций водорода в метано-водородо-воздушной смеси**

| №  | Доля водорода в смеси | Давление CJ, МПа | Скорость CJ, м/с |
|----|-----------------------|------------------|------------------|
| 1  | 0,1                   | 2,83             | 1811             |
| 2  | 0,2                   | 2,76             | 1816             |
| 3  | 0,3                   | 2,66             | 1824             |
| 4  | 0,4                   | 2,57             | 1830             |
| 5  | 0,5                   | 2,38             | 1838             |
| 6  | 0,6                   | 2,11             | 1852             |
| 7  | 0,7                   | 1,85             | 1868             |
| 8  | 0,8                   | 1,51             | 1890             |
| 9  | 0,9                   | 0,96             | 1920             |
| 10 | 1,0                   | 0,12             | 2018             |

Размер детонационной ячейки λ является параметром, имеющим практическое значение. На основе знания размера ячейки для конкретной смеси могут быть оценены возможность перехода от дефлаграции к детонации, ускорение пламени в определенных условиях. Оценка основана на сопоставлении ширины детонационной ячейки λ с длиной зоны индукции воспламенения Δ для детонации в водородо-метано-воздушных смесях. Размер детонационной ячейки λ является характерной особенностью смесей, а также информацией об их реакционной способности. Если известно значение размера детонационной ячейки, то становится воз-

возможным определить пределы детонации и энергию, необходимую для непосредственного инициирования детонации. До настоящего времени численное моделирование распространения детонации не позволяет корректно рассчитать трехмерную ячеистую структуру детонационной волны и, как следствие, не позволяет с достаточной точностью определить значение размера детонационной ячейки  $\lambda$  даже в случаях свободной атмосферы. Для загроможденного пространства ситуация значительно хуже и оценки опираются в основном на эмпирику. Наилучшим способом определения величины  $\lambda$  является экспериментальное исследование.

Многочисленные эксперименты [4], [5] показали, что размер детонационной ячейки  $\lambda$  может быть связан с длиной зоны индукции воспламенения  $\Delta$  для процесса детонации. В работе [6] было предложено использовать линейную зависимость

$$\lambda = A \cdot \Delta, \quad (1)$$

где  $A$  – параметр пропорциональности. Используя модель распространения детонационной волны, предложенную Зельдовичем-Нейманом-Дерингом (ZND), можно с хорошей точностью рассчитать длину зоны индукции воспламенения  $\Delta$ . Если известны значения длины зоны индукции воспламенения и параметра пропорциональности  $A$ , то можно рассчитать значение размера детонационной ячейки  $\lambda$ .

Длина зоны индукции воспламенения  $\Delta$  рассчитывалась с помощью программы, описывающей детонацию в рамках модели ZND (далее – программы ZND) [7]. При этом была проверена точность прогнозирования размера детонационной ячейки с использованием постоянного параметра пропорциональности  $A$ , проанализированы возможности повышения точности прогнозирования ширины ячейки с использованием параметра пропорциональности в зависимости от выбранных параметров детонации. В [1] также проведен краткий обзор других зависимостей между  $\lambda$  и длиной зоны индукции воспламенения  $\Delta$ . Расчеты с помощью программы ZND основаны на детальном механизме химической кинетики. Однако до настоящего времени не существует общепринятого детального механизма химической кинетики для водородо-метано-воздушных смесей.

С помощью программы CANTERA и модуля SDT toolbox [8] на базе химико-кинетического механизма,

который включает 39 видов и 154 реакции в [1] с помощью программы ZND [7] рассчитывалась длина зоны индукции  $\Delta$  реакции окисления в водородо-метано-воздушных смесях при начальной температуре 300 К. Результаты таких расчетов для начального давления 1 бар, а также их аппроксимация авторами статьи представлены на рис. 1.

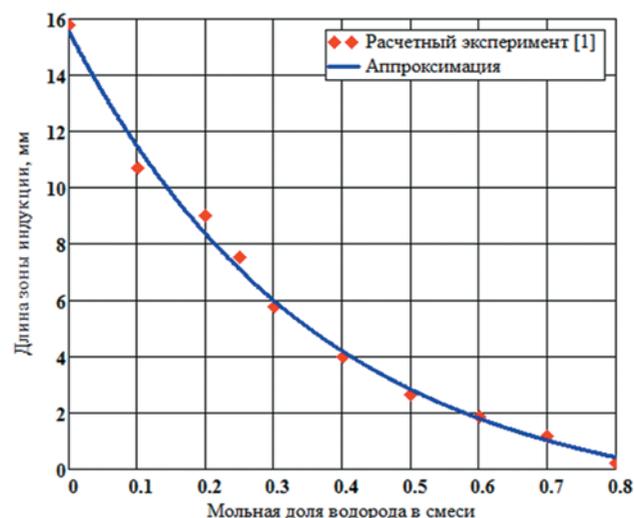


Рис. 1. Длина зоны индукции воспламенения в зависимости от мольной доли H<sub>2</sub> в смеси от 0 до 0,8

Заметим, что в исследовании [1] для вычисления размера детонационной ячейки  $\lambda$  использовалось уравнение (1), где коэффициент  $A$  равен 19.

Полученные результаты расчетов при таком подходе для различных составов смеси представлены в табл. 4.

Однако в представленных данных есть существенные расхождения с известными экспериментальными данными. Для получения более корректных с точки зрения физики размеров детонационной ячейки авторами статьи проведена корректировка представленных данных с использованием общеизвестных экспериментальных данных для чистых веществ (метан и водород), которая позволила скорректировать размеры ячеек детонационной волны в зависимости от мольной доли H<sub>2</sub> в смеси. После корректировки в диапазоне для мольной доли H<sub>2</sub> в смеси от 0 до 0,8, при начальном давлении 1 бар, размер детонационной ячейки  $\lambda$  находится в диапазоне 500 – 13,7 мм (см. табл. 5 и рис. 2).

Табл. 4. Размер ячейки детонационной волны в зависимости от состава смеси водород-метан-воздух [1]

| Мольная доля H <sub>2</sub> в смеси | 0     | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5  | 0,6   | 0,7 | 0,8  |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----|------|
| Размер детонационной ячейки, мм     | 321,4 | 282,7 | 153,8 | 110,0 | 69,49 | 50,4 | 32,50 | 227 | 5,45 |

Табл. 5. Размер детонационной ячейки при различном составе метано-водородной смеси по данным авторов статьи

| Мольная доля H <sub>2</sub> в смеси | 0   | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  |
|-------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Размер детонационной ячейки, мм     | 500 | 368,3 | 268,3 | 192,5 | 134,9 | 91,2 | 58,0 | 32,8 | 13,7 |

Зависимость размеров ячейки детонационной волны в зависимости от мольной доли  $H_2$  в смеси от 0 до 0,8 представлена на рис. 2.

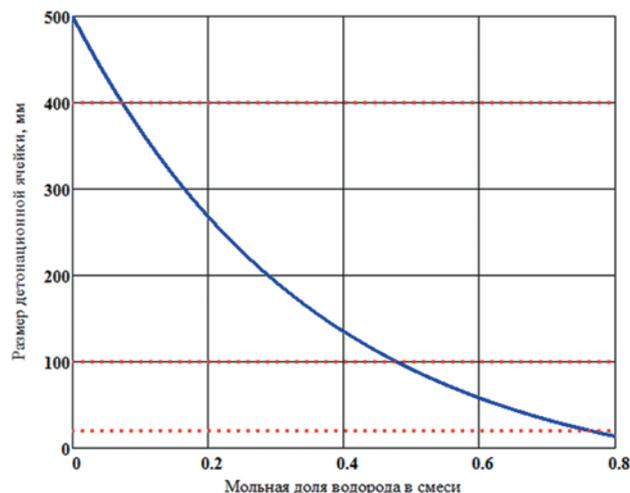


Рис. 2. Размер детонационной ячейки в зависимости от мольной доли  $H_2$  в смеси от 0 до 0,8

В табл. 6 представлены классы чувствительности взрывоопасных веществ к детонации в зависимости от размера детонационной ячейки в соответствии с Руководством по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [9].

Табл. 6. Классы чувствительности взрывоопасных веществ в зависимости от размера детонационной ячейки

| Класс 1                                  | Класс 2                                     | Класс 3                                      | Класс 4                                    |
|--|---|--|--|
| Особо чувствительные вещества            | Чувствительные вещества                     | Среднечувствительные вещества                | Слабочувствительные вещества               |
| (Размер детонационной ячейки менее 2 см) | (Размер детонационной ячейки от 2 до 10 см) | (Размер детонационной ячейки от 10 до 40 см) | (Размер детонационной ячейки больше 40 см) |

В соответствии с вышеуказанным РБ [9] и согласно табл. 6 и рис. 2, метано-водородные смеси с содержанием (по мольной доле) водорода более 76% относятся к 1 классу чувствительности (особо чувствительные вещества), с содержанием  $H_2$  от 76% до 47% ко 2 классу (чувствительные вещества), с содержанием  $H_2$  от 47% до 7% к 3 классу (среднечувствительные вещества). Смеси с содержанием водорода менее 7% (в том числе и чистый метан) относятся к 4 классу (слабочувствительные вещества). Если сравнивать по влиянию добавок в метано-воздушные смеси водорода или гомологов метана (этан, пропан, бутан), то на основе настоящего исследования и работы [10] можно констатировать, что добавки водорода в метано-воздушную смесь более слабо влияют на ее чувствительность к инициированию

взрывного превращения, нежели добавки гомологов метана (для последних характерным является перевод смеси в разряд чувствительных веществ уже при 9% содержании добавок [10]).

## Выводы

1. В работе дана классификация метано-водородных смесей по их чувствительности к инициированию взрывного превращения в зависимости от содержания водорода.
2. Показано, что разбавление метана водородом более слабо сказывается на чувствительности смеси к инициированию взрывного превращения, нежели разбавление гомологами метана (при одном и том же мольном содержании).
3. Замена природного газа с содержанием гомологов метана более 2,5% (среднечувствительные вещества согласно [10]) на метано-водородные смеси с содержанием водорода менее 45% не скажется на взрывоустойчивости объектов транспорта газа.

## Библиографический список

1. Porowski R., Teodorczyk A. Cellular structure of detonation wave in hydrogen-methane-air mixtures // Journal of Power Technologies. 2011. No. 91(3). Pp. 130–135.
2. The Element Potential Method for Chemical Equilibrium Analysis: Implementation in the Interactive Program STAN-JAN, Version 3: Technical Report / W.C. Reynolds. Dept. of Mechanical Engineering, Stanford Univ., Stanford, 1986. 49 p.
3. Goodwin D.G. Cantera C++ User's Guide. California Institute of Technology, 2002. 120 p.
4. Zhang Y., Huang Z., Wei L. et al. Experimental and modeling study on ignition delays of lean mixtures of methane, hydrogen, oxygen, and argon at elevated pressures // Combustion and Flame. 2012. Vol. 159. Pp. 918–931.
5. Трошин К.Я., Никитин А.В.; Беляев А.А. и др. Экспериментальное определение задержки самовоспламенения смесей метана с легкими алканами // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. Вып. 5. С. 17–24.
6. Oran E.S., Gamezo V.N. Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion // Combustion and Flame. 2007. Vol. 148. Pp. 4–47.
7. Lees F.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries / Ed. by S. Mannan. Elsevier, 2006. 3680 p.
8. STD Toolbox. Numerical Tools for Shock and Detonation Wave Modeling: GALCIT Report FM2018.01 / S. Kao, J. Ziegler, N. Bitter et al. California Institute of Technology, Pasadena, 2023. 326 p.
9. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». Утверждено приказом Ростехнадзора от 28.11.2022 № 412.
10. Гамера Ю.В., Петрова Ю.Ю. К вопросу о возможности отождествления свойств природного газа и метана при взрывах // Вести газовой науки. 2022. № 2(51). С. 221–228.

## References

1. Porowski R., Teodorczyk A. Cellular structure of detonation wave in hydrogen-methane-air mixtures. *Journal of Power Technologies* 2011;91(3):130-135.
2. Reynolds W.C. The Element Potential Method for Chemical Equilibrium Analysis: Implementation in the Interactive Program STANJAN, Version 3: Technical Report. Dept. of Mechanical Engineering; Stanford Univ. (Stanford); 1986.
3. Goodwin D.G. Cantera C++ User's Guide. California Institute of Technology; 2002.
4. Zhang Y., Huang Z., Wei L. et al. Experimental and modeling study on ignition delays of lean mixtures of methane, hydrogen, oxygen, and argon at elevated pressures. *Combustion and Flame* 2012;159:918-931.
5. Troshin K.Ya., Nikitin A.V., Belyaev A.A. et al. [Experimental determination of the delay in spontaneous ignition of mixtures of methane with light alkanes]. *Fizika gorennya i vzryva* 2019;55(5):17-24. (in Russ.)
6. Oran E.S., Gamezo V.N. Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion. *Combustion and Flame* 2007;148:4-47.
7. Lees F.P. Mannan S., editor. Lees' Loss Prevention in the Process Industries. Elsevier; 2006.
8. Kao S., Ziegler J., Bitter N. et al. STD Toolbox. Numerical Tools for Shock and Detonation Wave Modeling: GALCIT Report FM2018.01. California Institute of Technology; Pasadena; 2023.
9. [Methodology for assessing the consequences of accidental explosions of fuel and air mixtures. A safety manual]. Approved by Rostekhnadzor Order No. 412 dated 11.28.2022. (in Russ.)
10. Gamera Yu.V., Petrova Yu.Yu. Assessing which way various component compositions of natural gas affect the characteristics of detonation. *Vesti gazovoy nauki* 2022;2(51):221-228. (in Russ.)

## Сведения об авторах

**Гамера Юрий Васильевич**, ведущий научный сотрудник Лаборатории анализа риска на опасных производственных объектах Центра производственной безопасности ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (195112, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Малая Охта, пр-кт Малоохтинский, д. 45, литера А, помещ. 2-Н, офис 812), кандидат физико-математических наук, e-mail: Y\_Gamera@vniigaz.gazprom.ru

**Ганага Сергей Владимирович**, ведущий научный сотрудник Лаборатории промышленной безопасности Центра производственной безопасности ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (195112, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Малая Охта, пр-кт Малоохтинский, д. 45,

литера А, помещ. 2-Н, офис 812), кандидат физико-математических наук, e-mail: S\_Ganaga@vniigaz.gazprom.ru

**Петрова Юлия Юрьевна**, начальник Лаборатории анализа риска на опасных производственных объектах Центра производственной безопасности ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (195112, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Малая Охта, пр-кт Малоохтинский, д. 45, литера А, помещ. 2-Н, офис 812), кандидат физико-математических наук, e-mail: PetrovaYY@vniigaz.gazprom.ru

## About the authors

**Yurii V. Gamera**, Candidate of Physics and Mathematics, Lead Researcher, Laboratory for Hazardous Industrial Site Risk Analysis, Center for Industrial Safety, Gazprom VNIIGAZ LLC, 45, letter A, room 2-N, office 812 Malookhtinsky prospekt, Malaya Okhta, St. Petersburg, 195112, e-mail: Y\_Gamera@vniigaz.gazprom.ru

**Sergey V. Ganaga**, Candidate of Physics and Mathematics, Lead Researcher, Laboratory for Industrial Safety, Center for Industrial Safety, Gazprom VNIIGAZ LLC, 45, letter A, room 2-N, office 812 Malookhtinsky prospekt, Malaya Okhta, St. Petersburg, 195112, e-mail: S\_Ganaga@vniigaz.gazprom.ru

**Yulia Y. Petrova**, Candidate of Physicals and Mathematical, Head of Laboratory for Hazardous Industrial Site Risk Analysis, Center for Industrial Safety, Gazprom VNIIGAZ LLC, 45, letter A, room 2-N, office 812 Malookhtinsky prospekt, Malaya Okhta, St. Petersburg, 195112, e-mail: PetrovaYY@vniigaz.gazprom.ru

## Вклад авторов

**Гамера Ю.В.** – предложена идея проведения исследования, разработана методика обработки зарубежных экспериментальных данных, подготовлены графические материалы, сформулирована часть выводов по результатам работы.

**Ганага С.В.** – сформулирована концепция статьи, проведен анализ используемых литературных источников, на основе которого подготовлено порядка одной трети текста статьи, сформулирована часть выводов по результатам работы.

**Петрова Ю.Ю.** – выполнен обзор отечественной и зарубежной литературы и нормативной документации касательно вопросов чувствительности многокомпонентных смесей к инициированию взрывного превращения, сформулирована часть выводов по результатам работы.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Содержание выпусков журнала «Надёжность» за 2024 год

## Том 24, № 1 (2024)

**Сидняев Н.И., Баттулга Э.** Методология обнаружения и удаления аномальных значений в статистических исследованиях. *Надёжность*. 2024;24(1):4-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-4-9>

**Костокрызов А.И., Нистратов А.А.** Методический подход к вероятностному прогнозированию и сравнению качества функционирования систем в условиях неопределенности. *Надёжность*. 2024;24(1):10-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-10-24>

**Михайлов В.С.** Простой критерий эффективности смещенных оценок. *Надёжность*. 2024;24(1):25-33. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-25-33>

**Шевченко Д.Н.** Технологические ограничения марковского метода анализа надежности. *Надёжность*. 2024;24(1):34-40. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-34-40>

**Григорьев А.С., Маколкин Д.В., Тутнов А.И.** Надежность локальных энергосистем на базе автономных установок генерации. *Надёжность*. 2024;24(1):41-50. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-41-50>

**Гадоллина И.В.** Оценка оптимальной длины реализации случайного нагружения при исследовании долговечности деталей машин. *Надёжность*. 2024;24(1):51-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-51-57>

**Отока А.Г., Холодилов О.В.** Влияние частоты вращения и массы колесных пар на результат вибродиагностики буксовых узлов на стенде УДП-2021. *Надёжность*. 2024;24(1):58-64. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-58-64>

**Шебе Х.** Автоматизированное вождение поездов – валидация анализа рисков. *Надёжность*. 2024;24(1):65-72. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-65-72>

## Том 24, № 2 (2024)

**Воловик А.В.** Комбинаторный способ идентификации малой выборки. *Надёжность*. 2024;24(2):3-7. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-3-7>

**Дулин С.К., Рябцев А.Б.** Алгоритм улучшения согласованности структурной интероперабельности. *Надёжность*. 2024;24(2):8-15. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-8-15>

**Ширипурапу А., Шанкар Наупада Р., Шриниваса Рао К.** Улучшение алгоритма Дейкстры для оценки характеристик и критического пути проекта. *Надёжность*. 2024;24(2):16-23. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-16-23>

**Ефанов Д.В., Погодина Т.С.** Особенности обнаружения ошибок при контроле вычислений в цифровых устройствах по признаку самодвойственности булевых функций. *Надёжность*. 2024;24(2):24-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-24-37>

**Наумов И.В., Подъячих С.В., Полковская М.Н., Шерязов С.К., Бастрон А.В.** Оценка уровня надежности функционирования филиалов ПАО Россети России. *Надёжность*. 2024;24(2):38-51. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-38-51>

**Микони С.В., Семенов С.С.** К оцениванию технического уровня разведывательноударных и ударных беспилотных летательных аппаратов на стадии эксплуатации. *Надёжность*. 2024;24(2):52-60. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-52-60>

**Юницкий А.Э., Гарах В.А., Литвинович Т.С., Шевченко Д.Н.** Концепция безопасности движения в струнном транспортном комплексе. *Надёжность*. 2024;24(2):61-71. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-61-71>

**Михалевич И.Ф.** Концептуальные проблемы транспортной безопасности водных интеллектуальных транспортных систем. *Надёжность*. 2024;24(2):72-87. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87>

## Том 24, № 3 (2024)

**Дежков М.А., Тарасов К.А., Чернин М.А.** Увеличение пропускных и провозных способностей Восточного полигона с помощью использования передовых систем интервального регулирования движения поездов. *Надёжность*. 2024;24(3):3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-3-9>

**Романова А.С.** Начала законодательства для автономных систем искусственного интеллекта. *Надёжность*. 2024;24(3):10-17. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-10-17>

**Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н.** Оценки пределов вероятности неправильной классификации на примере прогнозирования опасных отказов. *Надёжность*. 2024;24(3):18-23. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-18-23>

**Полевский И.С.** Применение преобразования Хафа для определения границы путей в задачах компьютерного зрения аппаратно-программного комплекса фиксации исполненного движения. *Надёжность*. 2024;24(3):24-33. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-24-33>

**Рыков В.В., Иванова Н.М.** О функции надежности системы  $\langle GI_{k_{\text{сн}}}|GI \rangle$ . Часть I. Аналитические результаты. *Надёжность*. 2024;24(3):34-43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-34-43>

**Ннанг П.М., Сидоренко В.Г.** Выбор алгоритма машинного обучения для обнаружения вторжений в IoT. *Надёжность*. 2024;24(3):44-51. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-44-51>

**Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н.** Проблемы нормативного обеспечения функциональной надежности цифрового производства. *Надёжность*. 2024;24(3):52-60. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-52-60>

**Кузьминова А.В., Попов В.Д.** Влияние низкоинтенсивного облучения на быстродействие КМОП микросхем. *Надёжность*. 2024;24(3):61-66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-61-66>

## Том 24, № 4 (2024)

**Рыков В.В., Иванова Н.М.** О функции надежности системы  $\langle GI_{k_{\text{сн}}}|GI \rangle$ . Часть II. Численное исследование и анализ чувствительности // *Надёжность*. 2024. №4. С. 3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-3-11>

**Бочков А.В., Киркин М.А.** Об анализе временных рядов аварий и инцидентов на опасных производственных объектах // *Надёжность*. 2024. №4. С. 12-19. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-12-19>

**Лейзгольд К.А., Бочкарев С.В.** Определение необходимого количества запасных частей в условиях ограниченного объема данных // *Надёжность*. 2024. №4. С. 20-28. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-20-28>

**Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А.** Оценка, сравнение и ранжирование показателей оперативной надежности воздушных ЛЭП электроэнергетических систем // *Надёжность*. 2024. №4. С. 29-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-29-37>

**Маянц Ю.А., Ширяпов Д.И., Носова Е.С.** Исследование двукратного и многократного нагружения стержневых образцов трубной стали // *Надёжность*. 2024. №4. С. 38-47. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-38-47>

**Попов П.А., Розенберг Е.Н., Сабанов А.Г., Шубинский И.Б.** Комплексная безопасность АСУ ТП объектов КИИ железнодорожного транспорта // *Надёжность*. 2024. №4. С. 48-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57>

**Лобач Д.И.** О некоторых случаях количественной оценки ущерба технической системе // *Надёжность*. 2024. №4. С. 58-64. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-58-64>

**Гамера Ю.В., Ганага С.В., Петрова Ю.Ю.** К вопросу о взрывобезопасности объектов транспорта многокомпонентных смесей // *Надёжность*. 2024. №4. С. 65-69. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-65-69>



# 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 exchanging 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](http://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](mailto:a.bochkov@gmail.com) свою фотографию и краткую профессиональную биографию (резюме). Образцы можно найти на <http://www.gnedenko.net/personalities.htm>

## ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

с № \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. по № \_\_\_\_\_ 20\_\_ г., количество экз. \_\_\_\_\_

|   |  |
|---|--|
| Полное наименование организации                       |  |
| Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес) |  |
| Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)    |  |
| ИНН/КПП   |  |
| Расчетный счет  |  |
| Банк  |  |
| Корреспондентский счет                                |  |
| БИК   |  |
| Контактное лицо:<br>Ф.И.О., должность                 |  |
| Телефон/факс, e-mail                                  |  |

### Реквизиты:

ООО «Журнал «Надежность»

Тел./факс: +7 (495) 967-77-02,

e-mail: dependability@bk.ru

ИНН 7709868505 КПП 770901001

р/с 40702810100430000017, ПАО «УРАЛСИБ БАНК» г. Москва

к/с 30101810100000000787

### Адрес доставки:

Кому: \_\_\_\_\_

Куда: \_\_\_\_\_

Для оформления подписки на журнал «Надежность» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте.

По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.

Периодичность – 4 номера в год.

## ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

### Требования к формату статьи

Статья представляется в редакцию в электронном формате, в виде файла, созданного в текстовом редакторе MS Word из пакета Microsoft Office (файл с расширением \*.doc или \*.docx). Текст набирается черным шрифтом на листе формата А4 с полями: левое, верхнее, нижнее – 2 см; правое – 1,5 или 2 см. Минимальный объем статьи – 5 страниц, максимальный (может быть увеличен по согласованию с редакцией) – 12 страниц. При этом статья включает структурные элементы, описание которых представлено ниже.

### Структура материала статьи

Представленные ниже структурные элементы статьи отделяются друг от друга *пустой строкой*. Отдельные примеры оформления, как это должно выглядеть в тексте, выделены *синим шрифтом*.

### 1) Название статьи

Название статьи представляется на русском и английском языках. Название статьи на русском языке должно соответствовать содержанию статьи. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

*Оформление:* Текст названия набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». Точка в конце не ставится.

Пример:

**Повышение надежности электронных компонентов**  
**The Increasing of dependability of electronic components**

### 2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «\*»;

- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

паспорта и/или публикаций, для транслитерации фамилии и имени необходимо использовать стандарт BSI.

*Оформление:* Текст ФИО набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». ФИО разделяются запятой, точка в конце не ставится.

*Пример:*

**Иванова А.А.<sup>1</sup>, Петров В.В.<sup>2\*</sup>**  
**Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov**

### 3) Место работы автора (авторов)

Место работы авторов приводится на русском языке, перед указанием места набирается верхним индексом (надстрочным) соответствующая цифра сноски, указывающая на имя автора.

*Оформление:* Текст места работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

*Пример:*

<sup>1</sup>Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский институт теплоэнергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург

### 4) Адрес электронной почты автора, который будет вести переписку с редакцией

*Оформление:* Текст адреса набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «\*». Точка в конце не ставится.

*Пример:*

\*petrov\_vv@aaa.ru

### 5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

*Оформление:* Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

*Пример (на рус. яз.):*

**Резюме. Цель.** Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

## 6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

*Оформление:* Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

*Пример (на рус. яз.):*

**Ключевые слова:** надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, техническая эффективность.

## 7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

*Оформление:*

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например:

где  $n$  – количество изделий.

*Пример:*

### 1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь подрисуночные подписи. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. Отсылки на рисунки оформляются следующим образом: «На рис. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. рис. 3)». Сокращение «рис.» и номер рисунка (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Подрисуночная подпись включает порядковый номер рисунка и его название. Располагается на следующей строке после рисунка и выравнивается по центру:

#### Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после подрисуночной подписи не ставится. *При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать!* Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисуночном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). *При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями \*.tiff, \*.png, \*.gif, \*.jpg, \*.eps.*

Таблицы должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Таблицы должны быть пригодны для редактирования (а не отсканированные или в виде рисунков). Все таблицы должны иметь заголовки. Таблицы нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В табл. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. табл. 3)». Сокращение «табл.» и номер таблицы (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название. Располагается на строке, предшествующей таблице и выравнивается по центру:

#### Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после заголовка таблицы не ставится. *При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать!* Все обозначения (символы), приведен-

ные в таблицах, необходимо пояснять в основном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях в таблице и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов).

Математические обозначения в тексте набираются заглавными и строчными буквами латинского, греческого и русского алфавитов. Латинские символы всегда набираются наклонным шрифтом (курсивом), кроме обозначений функций, таких как  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\max$ ,  $\min$  и т.п., которые набираются прямым шрифтом. Греческие и русские символы всегда набираются прямым шрифтом. Размер шрифта основного текста и математических обозначений (включая формулы) должен быть одинаков; верхние и нижние индексы масштабируются в MS Word автоматически.

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть  $y = a \cdot x + b$ , тогда...

либо набираться в отдельной строке, с выравниванием по центру, например:

$$y = a \cdot x + b.$$

При наборе формул как в тексте, так и в отдельной строке, знаки препинания должны ставиться по обычным правилам – точка, если формулой заканчивается предложение; запятая (или отсутствие знака препинания), если предложение после формулы продолжается. Для разделения формулы и текста рекомендуется для строки с формулой устанавливать вертикальные отступы (6 пт перед, 6 пт после). Если в тексте статьи делается отсылка на формулу, то такая формула обязательно набирается отдельной строкой, по правому краю которой указывается номер формулы в круглых скобках, например:

$$y = a \cdot x + b. \quad (1)$$

Если формула набирается в отдельной строке и имеет номер, то данная строка выравнивается по правому краю, а формула и номер разделяются знаком табуляции; позиция табуляции (в см) выбирается таким образом, чтобы формула располагалась примерно по центру. Формулы, на которые в тексте делаются отсылки, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

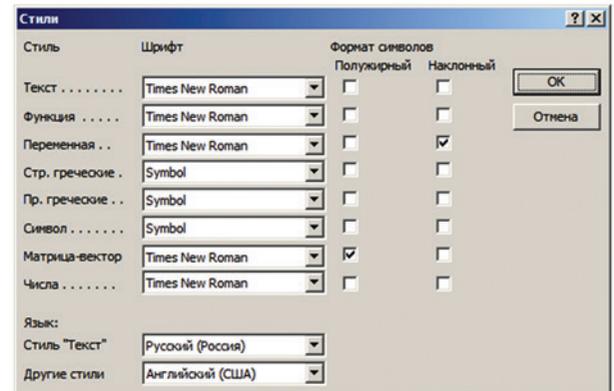
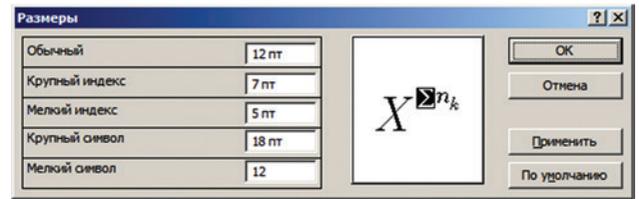
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

Если формула набирается без применения редактора формул, то между буквами и знаками «+», «-», «=» должны быть набраны неразрывные пробелы (Ctrl+Shift+Spacebar).

Сложные формулы набираются с применением редактора формул. Для отсутствия проблем с редак-

тированием формул и их версткой настоятельно рекомендуется использовать редакторы Microsoft Equation 3.0 или MathType 6.x. Для обеспечения корректного ввода формул (размер символов, их наклон и т.д.) рекомендуемые настройки редактора приведены на рисунках ниже.



При наборе формул в редакторе формул, если требуются скобки, то следует использовать скобки из формульного редактора, а не набирать их на клавиатуре (для корректной высоты скобок в зависимости от содержимого формулы), например (Equation 3.0):

$$Z = \frac{a \cdot \left( \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right)}{n + m}. \quad (2)$$

Сноски в тексте нумеруются арабскими цифрами, размещаются постранично. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники в сети Интернет, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах и журналах, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования), комментарии автора.

Отсылка на библиографический источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках, а источники приводятся в библиографическом списке в порядке их упоминания в тексте (затекстовые ссылки). Страница указывается внутри скобок, через запятую и пробел после номера источника: [6, с. 8]

## 8) Благодарности

В этом разделе указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей, но не

являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

*Оформление:*

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

## 9) Библиографический список

В библиографический список включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), упоминающиеся в тексте статьи. Нежелательно включать в библиографический список авторефераты, диссертации, учебники, учебные пособия, ГОСТы, информацию с сайтов, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах, на сайтах и в блогах. Если необходимо сослаться на такую информацию, следует поместить информацию об источнике в сноску.

При описании источника следует указывать его DOI, если удастся его найти (для зарубежных источников удастся это сделать в 95% случаев).

Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В ссылках на статьи из журналов должны быть обязательно указаны год выхода публикации, том и номер журнала, номера страниц.

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

Ссылки должны быть верифицированы, выходные данные проверены на официальном сайте журналов и/или издательств.

*Оформление:*

Оформление ссылок (в русскоязычной версии журнала) должно выполняться по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.

Библиографические ссылки набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» (см. примеры оформления в ГОСТ Р 7.0.5). Каждая

запись имеет нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от записи неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

## 10) Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество полностью (на русском и английском языках); полный почтовый адрес (включая индекс, город и страну); полное наименование места работы, занимаемая должность; ученая степень, ученое звание, почетные звания; членство в общественных союзах, организациях, ассоциациях и т.д.; официальное англоязычное название учреждения (для версии на английском языке); адрес электронной почты; перечень и номера журналов, в которых ранее публиковались статьи автора; фото авторов для публикации в журнале.

*Оформление:*

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

## 11) Вклад авторов в статью

Следует указать подробно, каким из авторов что сделано в статье. Например: Автором А. выполнен анализ литературы по теме исследования, автором Б. разработана модель объекта в реальных условиях эксплуатации, выполнен расчет примера и т.д. Даже если у статьи один автор, то требуется указание его вклада.

*Оформление:*

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

## 12) Конфликт интересов

Конфликт интересов – это условия, при которых у людей возникают вступающие в конфликт или конкурирующие интересы, способные повлиять на принятие редакторского решения. Конфликты интересов могут быть потенциальными или осознанными, а также реально существующими. На объективность могут повлиять личные, политические, финансовые, научные или религиозные факторы.

Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию о конфликте интересов в статью.

Если конфликта интересов нет, автор должен также сообщить об этом. Пример формулировки: «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

*Оформление:*

Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

# GUIDELINES FOR PUBLICATION IN THE JOURNAL «DEPENDABILITY»

## STRUCTURAL DEPENDABILITY

- Calculation methods, simulation processes and methods, application software packages, practical calculations of complex system dependability
- Mathematical maintenance theory, practical results of complex systems operation, system lifecycle, optimisation of dependability and cost at lifecycle stages
- Test methods, criteria for making decisions based on test results, accelerated tests, methods for assessing the dependability of systems based on test results

## FUNCTIONAL DEPENDABILITY

- Object, subject, and objectives of research, functional dependability indicators, terminology, principles and methods of calculation
- Methods for assessing and predicting the dependability of software, hardware and software systems, taking into account faults, software errors, operator errors, input information errors
- Processes and methods of functional dependability: functionally dependable software design processes, methods for building information processing and control algorithms immune to faults and operator errors, methods and techniques of input information error management, practical results

## FUNCTIONAL SAFETY OF SYSTEMS

- Functional safety indicators; safety functions, safety integrity
- Mathematical methods and models for defining the requirements for safety integrity and permissible time of hazardous failure detection, functional safety models of multichannel and multilevel systems
- Processes of functional safety assurance at all lifecycle stages

## FAULT TOLERANCE OF SYSTEMS

- Methods of passive failure protection, mathematical models of structural redundancy, gradual degradation of redundant systems, fault masking, results of passive failure protection
- Methods of active protection against structural failures and information process errors, principles and methods of active protection, theoretical foundations of active protection, technical solutions, efficiency evaluations of active protection

## RISK MANAGEMENT

- General risk theory, matters of risk formalisation methodology
- Facility-related risk classification. Principles and methods of risk assessment Methods for defining acceptable levels of risk. Methodology for managing risks of various nature
- Methods and models for identifying integral risks

## CERTIFICATION AND STANDARDISATION

- Accreditation of certification bodies and testing laboratories: the state of the art in Russia and abroad. Methods of certifying software and hardware systems according to the requirements of international functional safety standards
- Mandatory and voluntary certification: experience, opinions, suggestions
- System quality and dependability certification: regulatory requirements, test methods, practical results
- The effect of the Law On Technical Regulation on the development of the theory and practice of dependability and functional safety
- State of the art and future trends in the standardisation of dependability, fault tolerance, and survivability, functional safety and risk management

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN DEPENDABILITY AND SAFETY

- Methods for proactively managing dependability and safety
- Methods for assessing dependability and safety in the absence of complete data
- Standardisation of dependability and safety indicators in large systems
- Methods for designing the dependability and safety of unique critical systems

## TECHNICAL EFFICIENCY OF CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEMS

- Functional and technical efficiency indicators
- Methods for assessing the technical efficiency of control and management systems
- Design processes for control and management systems with superior efficiency
- Regulatory requirements for technical efficiency of control and management systems

## TECHNOLOGICAL ASSET MANAGEMENT

- Technological asset management in large systems
- Methodology of technological asset management
- Management of technological risks in large systems
- Management of resources of composite entities
- Business unit performance evaluation
- Corporate technological asset management platform

## BIG DATA. CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- Processes of data wrangling and feature selection for machine learning
- Methods and algorithms of machine learning, development and effects of Big Data application
- Predicting the state dynamics of control and management systems
- Using artificial intelligence in dependability and safety

## METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION SECURITY

- Methods for protecting information in automated control and management systems
- Methods for ensuring information security in software
- Information security systems
- Methods and processes for comprehensive functional safety and information security in control and management systems
- Processes for confirming compliance with information security requirements

## SYSTEMS ANALYSIS IN DEPENDABILITY AND SAFETY

- Methodology of analytical and system research in dependability and safety
- System research in management and decision-making. Strategic and operational management
- Data collection, processing and prediction. Statistics, probability theory, combinatorics, methods for measuring and simulation in systems analysis studies
- Managing information as part of systems analysis, control and management, decision-making systems

## INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

- Purpose and structure of modern ITS. Information and communication technologies and solutions as part of ITS development and operation
- Application and development of international practices in the process of Russian ITS development
- Role and place of safety systems within ITS
- Neural systems and artificial intelligence in ITS
- Reliable data and detection system
- Improved security through video analytics

## TERMINOLOGY OF DEPENDABILITY, FAULT TOLERANCE, SAFETY, RISKS, AND SURVIVABILITY

- Methodological matters of dependability, fault tolerance, safety, risk, and survivability terminology research
- Modern concepts in dependability, fault tolerance, safety, risks, and survivability
- The problem of harmonisation and standardisation of terminology in dependability, fault tolerance, safety, risks, and survivability adopted in Russia with the international practice
- Matters of standardisation of the terminology in dependability, fault tolerance, safety, risks, and survivability

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

**АО «НИИАС»** — ведущий отраслевой научно-технологический институт холдинга «РЖД» в области автоматизации и управления сложными технологическими процессами на железнодорожном транспорте.

**ЦЕЛИ:**

- эффективность;
- безопасность;
- надежность перевозок.



**Направления деятельности:**

- системы интервального регулирования и управления движением поездов;
- бортовые устройства безопасности;
- комплексные решения для цифровой станции;
- роботизация технологических процессов;
- моделирование технологических процессов и логистической инфраструктуры;
- информационная безопасность и кибербезопасность;
- транспортная безопасность;
- геоинформационные системы и технологии ДЗЗ;
- проектно-изыскательские работы;
- BIM-технологии;
- лабораторно-испытательный комплекс.

